

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
Institutul Politehnic Traian-Vulie Timișoara
Facultatea de Electrotehnică

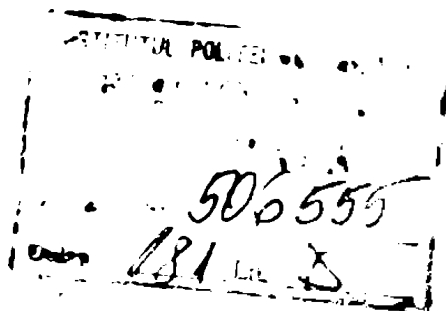
ing. Chioncel Petru

STUDIUL PRINCIPALELOR PROCESE TRAZZITORII
SI PROIECTAREA OPTICALA A EXCITATOAREI SIN-
CRONE CU DIODE ROTATIVE

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific:
Prof.dr.ing.Nevae I.

- 1985 -
Timișoara



C U P R I N S

INTRODUCERE	Pag.
LISTA DE NOTATII	5
Cap. I STUDIUL CRITIC AL SISTEMELOR DE EXCITATIE ALE GENERATOARELOR SINCRONE FOLOSITE IN PREZENT	11
1.1. Definierea, clasificarea și cerințele care se pun sistemelor de excitație	11
1.2. Scheme și particularități ale sistemului de excitație clasic	16
1.3. Scheme și particularități ale sistemului de excitație static	20
1.4. Sistemul de excitație cu excitatoare sincronă cu diode rotative	24
Cap. II CONSTRUCTIA SI FUNCTIONAREA IN SERVICIU A EXCITATOAREI SINCRONE CU REDRESOR ROTATIV CU DIODE	29
2.1. Construcția excitatoarei sincrone cu redresor rotativ cu diode	29
2.2. Studiul critic al tipurilor de înfășurări de induc ale excitatoarei sincrone	33
2.3. Redresarea polifazată în instalațiile de redresare rotitoare cu diode cu siliciu --.....	43
2.3.1. Montajul de redresare cu "comutație paralel".....	48
2.3.2. Montajul de redresare cu "comutație serie"	48
2.3.2.1. Tensiunea inversă și factorul de ondulație al redresorului ..	52
2.3.2.2. Curentul direct și factorul de utilizare al redresorului	53
2.3.2.3. Căderea de tensiune datorită comutației	53
2.3.2.4. Compararea modalităților de redresare	56

	Pag.
2.3.2.5. Soluție constructivă a instalației de redresare rotativă cu comutație serie	58
2.4. Soluțiile excitatoarei sincrone	61
Cap. III COMPORTAREA EXCITATOAREI SINCRONE CU DIODE ROTATIVE ÎN REGIM TRANZITORIU	69
3.1. Modelarea matematică a excitatoarei sincrone care lucrează pe sarcină prin redresor pentru studiul procesului de comutație și al regimurilor transi- torii	69
3.2. Studiul posibilităților de obținere a unei viteze de excitație corespu- nzătoare a sistemului de excitație ..	75
3.3. Studiul posibilităților dezexcitării rapide în caz de avarie	85
Cap. IV STUDIUL PROIECTĂRII OPTIMALE A EXCITATOAREI SINCRONE CU DIODE ROTATIVE	90
4.1. Stabilirea elementelor principale de care depinde com. ortarea corespu- nzătoare a sistemului de excitație și a ansamblului excitatoare-generator ...	90
4.2. Alegerea criteriului de optimizare la proiectarea excitatoarei sincrone cu diode rotative. Aplicația sa la calculul de dimensionare a înfășură- rii inductoare	97
4.3. Metodica practică de dimensionare a excitatoarei sincrone cu diode rota- tive	100
4.3.1. Dimensionare excitatoarei sincrone în varianta inițială	100
4.3.2. Dimensionarea punții redresoare cu diode rotative	104
4.4. Programul de optimizarea al excita- toarei sincrone pe baza criteri- ului vitezei de excitație maxime, pornind de la varianta inițială ...	107

	Pag.
Cap. V. APLICAREA PRACTICA A METODICII PROPUSE	
REZULTATE EXPERIMENTALE	112
5.1. Rezultatele proiectării unei game largi de excitatoare sincrone cu diode rotative utilizate la hidro- generatoarele sincrone	112
5.2. Dimensionarea unei excitatoare sincrone cu diode rotative pentru excitarea unui generator sin- cron de 6800 KVA; 6,3 KV; 750 rpm	115
5.3. Particularitățile încercării ex- citatoarei sincrone cu diode ro- tative pe standul de probă uzinal	123
5.4. Rezultatele experimentale obținu- te cu excitatoarea sincronă cu diode rotative proiectată	128
Cap. VI CONCLUZII	145
Anexe	149
Bibliografie	153

INTRODUCERE

Mașina sincronă, funcționând în regim de generator, este practic producătorul exclusiv de energie electrică sub forma curentului alternativ și elementul de bază al centralelor electrice.

Cîmpul magnetic inductor al mașinii sincrone se realizează cu ajutorul unei înfășurări plasată în rotor, denumită înfășurare de excitație. Alimentarea înfășurării de excitație a mașinii sincrone se face de la o sursă de curent continuu, la care se leagă cele două capete ale înfășurării de excitație, astfel încît cîmpul magnetic pe care îl produce este fix față de structura rotorului. Acest cîmp magnetic prezintă o repartiție practic sinusoidală în spațiul întrefierului, la periferia rotorului, rămînînd constant în timp în raport cu rotorul.

În timpul funcționării, rotorul și deci distribuția spațială a cîmpului magnetic în întrefier se rotește, astfel încît conductoarele înfășurării statorului, vor sesiza acest cîmp magnetic sinusoidal variabil în timp.

Cînd generatorul sincron funcționează în sarcină, indusul acestuia este parcurs de un sistem polifazat (de obicei trifazat) de curenți alternativi, care la rîndul lor crează un cîmp magnetic învîrtitor. Suprapunerea solenațiilor celor două părți ale mașinii determină solenația rezultantă a mașinii, care crează cîmpul magnetic învîrtitor rezultat.

La funcționarea în regim autonom a generatoarelor sincrone, în cazul încărcării mașinii la sarcina preponderent inductivă, menținerea constantă a tensiunii la borne necesită creșterea considerabilă a excitației, datorită efectului componentei demagnetizante a cîmpului de reacție a indusului, respectiv se impun modificări ale excitației în cazul variațiilor bruște ale sarcinii.

În afara regimului autonom, al doilea mod de bază în funcționarea generatoarelor îl constituie mersul în paralel, tot mai folosit ca urmare a interconectării progresive a rețelelor electrice și creșterii puterilor unitare ale mașinilor. Mersul în paralel impune totodată exigențe sporite sistemului de excitație, referitoare în special la puterea, rapiditatea și sensibilitatea

ace tuiă, ceea ce și explică dezvoltarea excitatoarelor și reguletoarelor automate de tensiune.

Până nu de mult, sistemele de excitație au fost în majoritatea cazurilor bazate pe mașina de curent continuu, care a fost folosită atât ca excitatoare principală, cât și auxiliară și curentulator automat de tensiune electromagnetice.

În vederea îmbunătățirii comportării generatoarelor sincrone, în special în diferite regimuri dinamice ca: scurtcircuit la barele generatorului, funcționarea în asincron, conectarea sau deconectarea unor sarcini combinate (active și reactive) sistemele de excitație clasice cu excitatoare de curent continuu au fost completate respectiv înlocuite cu alte sisteme de excitație. Astfel, la generatoarele sincrone mari, care reprezintă tendința actuală, se folosesc din ce în ce mai mult următoarele sisteme de excitație:

- Sistemul de excitație cu excitatoarei sincronă, cu redresor rotativ sau static;
- Sistemul de excitație static

În lucrare se analizează sistemul de excitație cu excitatoare sincronă cu diode rotative, destinat generatoarelor sincrone în modul următor:

- În capitolul I, după definirea, clasificarea și prezentarea succintă a cerințelor care se pun în fața sistemelor de excitație utilizate în prezent, se pot în relief avantajele, în anumite cazuri, ale sistemului de excitație cu excitatoare sincronă cu diode rotative, față de alte sisteme de excitație, cu excitatoare de curent continuu și static.

- În capitolul al II-lea se abordează construcția excitatoarei sincronă cu diode rotative și se stabilesc ecuațiile generale ale acestei mașini, de tip generator sincron inversat, pe baza aplicării originale a teoriei celor două axe. Sub aspect constructiv funcțional se insistă asupra tipurilor de bobinaj ale indusului utilizate la excitatoarea sincronă, în corelare cu posibilitățile de alegere și realizare a instalațiilor de redresare cu diode rotative. Unele soluții originale de realizare a înfăgurării rotorice și a instalației de redresare rotativă polifazăată, sînt exemplificate împreună cu parametrii mai importanți ale unor variante realizate.

- Capitolul al III-lea tratează comportarea excitatoarei sincrone cu diode rotative în regim tranzitoriu. După prezentarea unui model matematic al excitatoarei sincrone lu-

orind pe sarcină prin redresor și a modului general de tratare al proceselor transitorii, se studiază principalele două regimuri nestaționare importante pentru aceste mașini și anume: forțarea excitației cu determinarea vitezei de excitație și dezexcitarea rapidă, precum și posibilitățile de îmbunătățire a parametrilor mașinii la funcționarea în aceste regimuri.

- În capitolul al IV-lea se elaborează o metodică de dimensionare optimă originală a excitatoarei sincrone cu diode rotative. În acest scop se stabilesc elementele principale de care depinde comportarea corespunzătoare a ansamblului excitatoarei-generator sincron și se alege criteriul de optimizare pentru proiectarea excitatoarei sincrone cu diode rotative. De asemenea, se prezintă metoda practică de proiectare și schema bloc pentru calculul electromagnetice care cuprinde și ciclul de optimizare al înfășurării inductoare al excitatoarei, pe baza criteriului vitezei de excitație maximă.

- Capitolul al V-lea prezintă aplicarea practică a metodicii propuse și rezultatele experimentale obținute. Astfel principalele rezultate obținute în proiectarea unei game largi de excitatoarei sincrone cu diode rotative utilizate la hidrogenereatoarele sincrone sînt cuprinse într-un tabel centralizator. Pentru exemplificare se prezintă apoi dimensionarea unei excitatoarei sincrone cu diode rotative, pentru excitarea unui hidrogenenerator sincron dat, împreună cu varianta de calcul optimă. De asemenea se ilustrează prin instalația de încercare și schema de legături corespunzătoare, modul de încercare al acestor mașini pe standul de probă al uzinei producătoare - Întreprinderea de Construcții de Mașini Reșița. Rezultatele experimentale obținute cu excitatoarea sincronă cu diode rotative proiectată, constind dintr-un număr de măsurători oscilografiate și prelucrate, confirmă cu o bună aproximație, metoda de proiectare elaborată și aplicată la mașinile de acest tip, ale căror proiecte se execută la Centrul de Cercetare Științifică și Inginerie Tehnologică pentru Echipamente Hidroenergetice Reșița și care se aplică la un număr de hidrogenereatoare produse de Întreprinderea Constructoare de Mașini Reșița.

- În încheiere, într-un capitol de concluzii se evidențiază principalele contribuții și utilitatea practică a lucrării, în activitatea de proiectare și fabricație a acestui tip de mașini.

Autorul aduce caled mulțumiri conducătorului

științific tovarăgului prof.dr.ing. Novac Ioan, pentru îndrumarea și sprijinul de care s-a bucurat constant pe toată perioada elaborării lucrării.

LISTA DE NOTATII

- A -pătura de curent sau solenștia specifică a indusului
excitatorului
- $B_{x,t}$ -inducția magnetică a inductorului excitatorului
- B_{δ} -inducția magnetică în întrefier, valoarea medie pe un
pas polar
- $B_{z1/3}$ -inducția magnetică la 1/3 din înălțimea dintelui rotorului
- B_{jr} -inducția magnetică în jugul rotorului
- B_{js} -inducția magnetică în jugul statorului
- B_k -inducția magnetică la corpul polului
- b_{cu} -lățimea conductorului rotorului elementar neizolat
- b_{cl} -lățimea creștăturii rotorului
- b_p -lățimea ideșii a tălpii polare
- b_k -lățimea corpului polului
- b_{st} -lățimea jugului statorului
- b_c -lățimea canalului de ventilație radială
- C_m -valoarea medie a distanței dintre miezurile polilor vecini
- C_p -valoarea medie a distanței dintre două piese polare vecine
- d -axa longitudinală sau axa polilor inductorului
- D_{er} -diametrul exterior al indusului (rotorului)
- D_{ir} -diametrul interior al indusului
- D_{es} -diametrul exterior al jugului statorului
- D -înfășurarea de amortizare longitudinală
- F_{δ} -tensiune magnetică în întrefier
- F_o -tensiune magnetică rezultantă la mers în gol
- F_s -tensiune magnetică de reacție a indusului
- F_{en} -tensiune magnetică rezultantă la mers în sarcină nominală
- f -frecvența tensiunii electromotoare induse
- H -tensiune magnetică specifică pe diferențele porțiunii ale
circuitului magnetic: H_d în dinții rotorului, H_{j1} în jugul
rotorului, H_{j2} în jugul statorului, H_k în poli.
- h_{cu} -înălțimea conductorului elementar rotorului neizolat
- h_{cl} -înălțimea creștăturii rotorului
- h_{jr} -înălțimea jugului rotorului
- h_m -înălțimea polului statorului sau de excitație
- h_{js} -înălțimea jugului statorului
- h_p -înălțimea piesei polare
- h_p -înălțimea penei și a istmului creștăturii
- I_{ENG} -curentul nominal de excitație al generatorului sincron

- I_{ES0} -curentul redresat al excitatoarei la inelele redresorului rotativ
- I_{ES1} -fundamentalsa curentului excitatoarei
- I_{ES} -curentul de fază al excitatoarei, valoare eficace
- $I_{ESE} = I_{ESEn}, I_{ESEf}$ -curentul de excitație al excitatoarei la mers în gol, în regim nominal și în regimul de forțare
- i -curentul prin fazele excitatoarei în timpul procesului de comutație
- I_{FAV} -curentul mediu redresat de diodă
- I_{VM} -curentul invers de vîrf al diodei
- I_{FSM} -curentul direct de vîrf prin diodă
- I_d -curentul într-o diodă valoare eficace
- I_o -curentul mediu admis pe diodă
- I_{of} -curentul mediu pe diodă în regim de forțare
- i_d, i_q, i_o -componentele longitudinală, transversală și homopolară a curentului din indus
- i_d', i_q' -componentele longitudinală și transversală ale curentului redresat
- j_{ES} -densitatea de curent, în înfășurarea indusului
- j_{ESE} -densitatea de curent, în înfășurarea de excitație
- k_o -coeficientul lui Carter
- k_f -factorul de forțare al excitației
- k_w -factorul de înfășurare
- K_d, K_q -coeficienți din expresiile reactanței longitudinale și transversale
- K_f, K_o -factori de formă, a curbei cîmpului din întrefier și de excitație
- K_j -coeficient de pierderi prin efect "Joule"
- K_o -factorul de ondulare al tensiunii redresate
- K, K_1, K_2 -factori de modificare a componentelor tensiunii și curentului la redresare
- k_n -factor de repartizare a curentului în diodele conectate în paralel
- k_y -factorul de scurtare al înfășurării indusului
- f_n -factorul de utilizare al indusului excitatoarei (subunitar)
- \mathcal{L} -simbolul transformatei Laplace
- L_{11}, L_{1j} -inductivitățile totale (proprii și de dispersie) și cele mutuale ale înfășurărilor cu indicii "i", "j"
- L -lungimea excitatoarei
- L_{p1} -lungimea unui pachet elementar
- l_1 -lungimea ideală

- l_p -lungimea polului
- l_j -lungimea jugului stator
- l_w -lungimea medie a unei spire a indusului
- l_{we} -lungimea medie a spirei unei bobine a înfășurării de excitație a excitatoarei
- M -cuplul electromagnetic al excitatoarei sincrone
- m -numărul de faze al înfășurării indusului
- n, n_s -turația nominală și de ambalare
- n_p -numărul de pachete elementare ale indusului
- $n_1 = \frac{60f}{p}$ -turația de sincronism
- n_B -numărul canalelor radiale de ventilație
- N_p -număr de diode în paralel pe braț de punte redresoare
- P -operator din calculul operațional (Heaviside)
- $2p$ -numărul de poli ai excitatoarei
- P_{EG} -puterea de excitație a generatorului sincron
- P_{ES_0} -puterea de excitație la inelele redresorului rotativ
- P_{Fe} -pierderile în fier ale excitatoarei
- P_{sc} -pierderile în scurtcircuit
- P_{ESE} -pierderile în excitație ale excitatoarei sincrone
- ΔP -pierderile în redresorul rotativ
- $\Sigma P_{>}$ -pierderile din excitatoare datorită armonicilor de curent
- P_t -pierderile totale
- q -axa transversală interpolară
- q -numărul de creștături pe pol și fază
- R_1, R_1' -rezistențele electrice ale înfășurărilor, în valoare absolută și raportată ale înfășurărilor cu indicele "i".
- R_{EG} -rezistența înfășurării de excitație a generatorului sincron
- R_{ESE} -rezistența înfășurării de excitație a excitatoarei
- R_{ESE}' -rezistența înfășurării de excitație a excitatoarei redusă la rotor
- R_{DE} -rezistența de dezexcitare a excitatoarei
- S_G -puterea aparentă nominală a generatorului sincron
- S_{ES} -puterea aparentă nominală a excitatoarei sincrone
- S_{ESE} -secțiunea transversală a conductorului înfășurării de excitație a excitatoarei
- S_{ESE_0} -secțiunea transversală optimă a conductorului înfășurării de excitație a excitatoarei
- S_{ESb} -secțiunea barei indusului
- S_p -secțiunea polului excitatoarei
- T_{ms} -constanta de timp a înfășurării de excitație a excitatoarei

- T_{ED} - constanta de timp a infășurării de excitație a excitatoarei cu rezistențe de dezexcitare conectată
- t_1 - pasul creșterilor rotorice
- U_{ϕ} - tensiune de fază, valoare eficace și valoare raportată
- $U_{d,q}$ - componentele longitudinale, transversală și homopolară a tensiunii
- U_{ENG} - tensiunea nominală a infășurării de excitație a generatorului sincron
- U_{EF} - tensiunea de forțare a infășurării de excitație a generatorului sincron.
- U_{ESe} - tensiunea electromotoare indusă pe fază a excitatoarei
- U_{ESe} - tensiunea nominală redresată la inelele redresorului rotativ
- U_{ESi} - tensiunea internă a excitatoarei care ține cont de căderea de tensiune în redresor
- U_{ESm} - valoarea maximă a tensiunii de fază a excitatoarei
- U_{emax} - tensiunea maximă redresată
- U_{ESl} - fundamentala tensiunii la borne a excitatoarei
- $U_{ESE}, U_{ESm}, U_{ESEf}$ - tensiunea de excitație a excitatoarei la mers în gol, în regim nominal și în regim de forțare
- $U_{inv max}$ - tensiune inversă maximă pe diodă
- v_{ex} - viteze de excitație nominală a excitatoarei sincronice cu diode rotative
- $v_{ex min}$ - viteze de excitație minimă impusă
- $v_{ex,0}$ - viteza de excitație optimă
- $v_{ex max}$ - viteza de excitație maximă
- v_p - viteză periferică a indusului
- V_{EEm} - tensiunea inversă de vîrf de lucru pe diodă
- V_{ESM} - tensiunea inversă de vîrf de suprasarcină accidentală
- V_{EM} - tensiunea directă de vîrf pe diodă
- W - numărul de spire pe fază
- W_{ESE} - numărul de spire al infășurării de excitație a excitatoarei
- W_{ESE0} - numărul de spire optim al infășurării de excitație a excitatoarei
- X_{ad}, X_{aq} - reactanțe de reacție longitudinale și transversale a excitatoarei sincronice.
- X_{EG} - reactanța infășurării de excitație a generatorului sincron
- X_d, X_q, X'_d, X'_q - reactanțe longitudinale și transversale a excitatoarei sincronice în regim permanent și tranzitoriu
- $X_{\sigma d}$ - reactanța de scăpări diferențiale a excitatoarei
- X_{σ} - reactanța de dispersie a indusului excitatoarei pe fază
- X_{ESE} - reactanța infășurării de excitație a excitatoarei
- X_{ESm} - reactanța de scăpări a infășurării de excitație a excitatoarei

x_c	-reactanța de comutație a excitatoarei
J, J_1, J_2	-peșii înfășurării indusului
Z	-numărul de creștături al rotorului
Z_{EG}	-impedanța înfășurării de excitație a generatorului sincron, sarcina redresorului rotativ.
α_i	-raportul dintre lungimea arcului piesei polare și lungimea pasului polar
α	-unghiul de comutație sau de suprapunere al redresorului
$\beta = \frac{\delta}{\tau}$	-scurtarea înfășurării indusului
δ	-lățimea minimă a întrefierului, în axa polului
$\delta = \frac{\delta_{max}}{\delta}$	-raportul dintre valoarea maximă și minimă a întrefierului excitatoarei
ϕ	-fluxul magnetic al excitatoarei sincrone în indus
ϕ_k	-fluxul magnetic în corpul polilor excitatoarei
η	-randamentul excitatoarei
λ	-permeanță specifică a polilor excitatoarei
λ_m	-permeanță specifică a corpului polilor
λ_p	-permeanță specifică a tălpilor polare
μ_{Fe}	-permeabilitatea magnetică a fierului
ρ_θ	-rezistivitatea electrică la temperatura " θ "
ΣP	-suma pierderilor din excitatoarea sincronă
σ_e	-coeficientul de dispersie al înfășurării polilor vecini și excitatoarei
$\sigma_{k,p}$	-factori de dispersie pentru fluxul magnetic din corpul polilor și tălpile polare
ν	-unghi de defazaj dintre axa de referință și axa fazei de ordinul " λ ".
τ_p	-lungimea pasului polar
ψ_d, ψ_q	-fluxul magnetic înălțuit de înfășurarea indusului excitatoarei, longitudinal, transversal, homopolar și de scăpări, valori instantanee
ψ_o, ψ_o'	-fluxul magnetic înălțuit de înfășurarea de excitație, a excitatoarei, valoare instantanee
ψ_{ESE}	-fluxul magnetic înălțuit de înfășurarea de excitație, a excitatoarei, valoare instantanee
ψ_o, ψ_q	-fluxul magnetic longitudinal și transversal înălțuit de înfășurarea de amortizare.
ψ, φ	-unghiuri de defazaj
ω	-pulsăția tensiunii
$U_{I, II, III}$	-tensiuni electromotoare induse în fazele înfășurării indusului în timpul comutației
$U_{I, II, III}$	

Capitolul I

STUDIUL CRITIC AL SISTEMELOR DE EXCITAȚIE ALE GENERATORILOR SINCRONE FOLOSITE ÎN PREZENT

1.1. Definierea, clasificarea și cerințele care se pun sistemelor de excitație

În accepțiunea generală, sistemul de excitație cuprinde în structură se stă sursa de energie care permite excitarea mașinii sincrone, cit și elementele de control și reglare manuală sau automată.

Sistemele de excitație se clasifică în funcție de natura sursei de excitație în: sisteme de excitație cu mașini electrice rotative și sisteme de excitație statice. Sistemul de excitație cu mașini electrice de curent continuu constituie așa numitul sistem clasic de excitație.

Sistemele de excitație se clasifică și în funcție de posibilitatea generatorului sincron de a fi excitat cu sau fără aportul unei surse de tensiune exterioară grupului generator sistem de excitație în: sisteme de excitație neautonome și sisteme de excitație autonome.

Sistemele de excitație neautonome necesită alimentarea lor de la o sursă de tensiune separată, diferită de generatorul sincron pe care îl excită, aceasta obținându-se de exemplu de la serviciile auxiliare din centralele electrice sau de la un grup de excitație separat cu mașini electrice rotative sau sistem de excitație static.

Sistemele de excitație autonome asigură excitarea generatorului sincron fără sursă de tensiune exterioară, de exemplu prin alimentarea sistemului de excitație de la bornele înfășurării statorice a generatorului sincron, sau prin excitarea în derivație a excitatoarei.

În general sistemul de excitație trebuie să satisfacă următoarele cerințe: schema de excitație să fie cit mai simplă și să prezinte siguranță deplină în funcționare; puterea de excitație este de dorit să fie cit mai mică, comanda ușoară și reglarea continuă, să asigure parvenirea de excitație în toate regimurile de funcționare, să fie sensibil, rapid și să ocupe un spațiu cit mai redus.

În cazul cînd generatorul sincron trebuie să furnizeze putere unei linii de transport, se impune asigurarea stabilității și a reglajului fin de tensiune, în zone curenților de excitație mai mici decît curenții de excitație la mers în gol.

La funcționarea normală sistemul de excitație trebuie să realizeze limitarea variațiilor de tensiune, repartizarea stabilă a puterii reactive și asigurarea unui domeniu larg de stabilitate statică a generatorului.

Limitarea oscilațiilor de tensiune este una din cele mai vechi cerințe impuse sistemului de excitație. Un sistem de excitație ar fi ideal dacă ar menține tensiunea la bornele generatorului constantă în orice situație. Practic se urmărește obținerea unor variații cât mai mici și lente ale tensiunii. Mărimile variațiilor de tensiune depinde de posibilitatea unei influențări rapide în mod corespunzător a curenților de excitație a generatorului prin sistemul de excitație, concret prin regulator și de constante de timp efectivă a excitației în fiecare punct de lucru. Constante de timp a înfășurării de excitație a generatorului sincron se consideră ca a mărimii date. Deci, limitarea variațiilor de tensiune se poate realiza cu atât mai ușor, cu cât sistemul de excitație (regulator, excitație) este mai rapid și mai sensibil, iar stabilizarea mai bună.

Atît timp cît generatorul sincron funcționează în regim echilibrat, pe rețea nu apar probleme de stabilitate, sub aspectul puterii reactive, iar puterea activă este reglată de regulatorul turbinei. Caracteristicile de reglaj, care poate fi statică (tensiunea scade cu puterea reactivă) sau statică (tensiunea independentă de puterea reactivă) prezintă importanță deosebită sub aspectul preciziei de menținere constantă a tensiunii.

La mersul în paralel cu alte generatoare respectiv cînd generatorul este conectat la o rețea rigidă, reglajul tensiunii generatorului trebuie influențat suplimentar, iar pentru repartizarea puterii reactive pe diversele mașini se procedează la alegerea unei caracteristici de reglaj potrivite.

La deconjecțiuni grave, cîmpul principal al mașinii afectate trebuie sprijinit, adică excitația trebuie mărită și mai puternic în timp scurt.

Atît la mersul în sarcină normală cît și la șocuri de sarcină menținerea constantă a tensiunii la borne și a cîmpului mașinii sincron necesită timpuri scurți de răspuns din partea regulatorului și constante de timp mici ale excitației, în punctul de lucru respectiv.

Sistemul de excitație trebuie să asigure posibilitatea unei supraexcitări rapide a generatorului sincron în caz de avarii, scurtcircuite, cînd tensiunea la bornele generatorului scade, accentuat, ceea ce duce la pierderea stabilității mașinii și în cazuri mai grave poate provoca ieșirea din sincronism. De asemenea sistemul de excitație trebuie să asigure posibilitatea unei deexcitări rapide, în situație în care, între înfășurarea statorică și corpul mașinii apare un arc electric (străpungere) sau scurtcircuit între spire la înfășurarea statorică a generatorului.

În general, pentru a evita funcționarea nestabilă a sistemului este necesar să se poată obține, rapid, la nevoie o creștere sensibilă a curentului de excitație a generatorului sincron (I_{EG}); metoda cea mai simplă pentru atingerea acestui scop constă în a asigura o creștere rapidă a tensiunii excitatoarei.

Se definește ca "factor de forțare", raportul dintre limita superioară a tensiunii excitatoarei (plafonul de excitație sau tensiunea de forțare) și tensiunea nominală de excitație, cu excitatoarea conectată la înfășurarea de excitație a mașinii sincrone, funcționând în sarcină și se exprimă prin relație:

$$K_f = \frac{U_{EF}}{U_{EN}} \quad (1)$$

Acest raport trebuie să fie (B 64): pentru compensatoarele sincrone minim 2 u.r., pentru hidrogenatoare minim 1,6 u.r., iar pentru toate celelalte mașini sincrone minim 1,4 u.r.

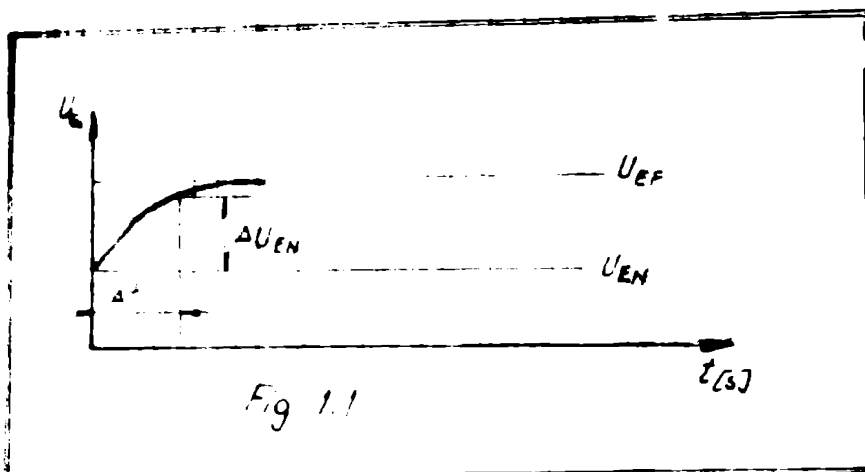
Înfășurările de excitație ale mașinilor sincrone trebuie, deci, dimensionate în așa fel, încît să suporte timp limitat (de obicei cea. 10 secunde) curenții de excitație corespunzători tensiunii de forțare a excitatoarei.

Pe lângă factorul de forțare o caracteristică importantă a excitatoarelor o constituie viteza de creștere a tensiunii de excitație, în cazul forțării excitației numită "viteză de excitație" și definită prin relație (B 64):

$$V_{ex} = \frac{\Delta U_{EN}}{\Delta t} \quad (2)$$

În relația (2) " ΔU_{EN} " reprezintă creșterea tensiunii de excitație de la valoarea nominală și " Δt " este timpul necesar acestei creșteri.

Viteza de excitație nominală, în cazul în care creșterea tensiunii de excitație se produce de la valoarea nominală se măsoară în mod obișnuit cu excitatoarea în gol, dacă nu se prevede altfel (figure 1.1).



Pentru mașinile sincrone cu regleje ultrarapid al excitației (sistemele statice), viteza de excitație se referă la durata de timp în care se stinge plafonul tensiunii de excitație. Viteza de excitație, care

trebuie asigurată pentru generatoarele sincrone cu puteri mai mari de 100 MVA nu trebuie să fie inferioară valorii de 0,8 u.r./sec(B64).

Din necesitatea stingerii tensiunii plafon de excitație cu o viteză de creștere cât mai mare, excitatoarele se dimensionează astfel încât, în regiunea nominală de funcționare, punctul de funcționare să se afle în zona nesaturată a caracteristicii de magnetizare. Dacă circuitul magnetic este nesaturat o creștere mică a curentului de excitație a excitatoarei determină o creștere însemnată a tensiunii, într-un timp scurt. De aceea, în proiectarea excitatoarelor se consideră atât o funcționare de durată în regiunea nominală, cât și o funcționare de scurtă durată corespunzând regiunii de forțare a excitației, regiunea pentru care se dimensionează circuitul magnetic și elementele de transmitere a curentului adică colectorul, perii, inelele de contact și suportii de perii, care vor fi deci supradimensionate.

Forțarea excitației, adică folosirea curentului maxim de excitație pe care îl poate debita excitatoarea mărește foarte mult stabilitatea funcționării în paralel a centralelor prin creșterea t.e.m. indusă a generatorului sincron, care asigură restabilirea rapidă a tensiunii după întreruperea scurtcircuitelor și mărește siguranța în funcționare a protecției prin relee temporizate. Aceasta este importantă, în special în sistemele care funcționează cu o rezervă mică de putere.

Astfel, scăderea tensiunii la bornele generatorului sincron determină prin acțiunea regulatorului automat de tensiune o creștere a curentului de excitație al excitatoarei, care la rândul său provoacă o variație a tensiunii la bornele excitatoarei după o curbă aproximativ exponențială. În figura 1.2, sunt reprezentate curbele de variație ale tensiunii la bornele excitatoarei în timp, pentru excitație separată (curbe 1), respectiv în derivație a excitatoarei (curbe 2).

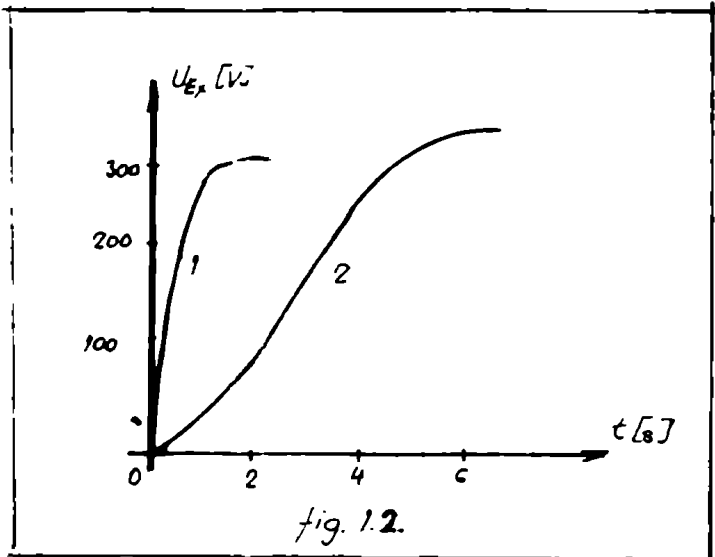


fig. 1.2.

În cazul autoexcitației în derivație creșterea tensiunii este la început întârziată datorită t.e.m. induse în excitatoare, ca efect al autoexcitației.

Această întârziere a creșterii de tensiune este repede depășită, iar curba de variație primește o alură rapid crescătoare.

Cotul de înclinare rapidă cu care se termină cele două curbe este provocat de saturația magnetică, care se produce în regimul de forțare și care atrage o micșorare a inductanței circuitului de excitație, provocând în același timp o creștere progresivă și rapidă a constantei de timp a excitatoarei. Din acest punct de vedere excitatoarele cu excitație separată ar fi de preferat, dar acestea necesită o schemă de excitație cu subexcitatoare sau alimentare de la o altă sursă de curent continuu. De obicei schemele de excitație, cu excitatoare separată sînt prevăzute cu posibilitatea trecerii automate la funcționarea în autoexcitație, astfel că, în ipoteza unui deranjament, care duce la căderea serviciilor interne ale centralei să fie asigurată funcționarea în continuare a mașinii.

Asigurarea dezexcitației rapide a generatorului sincron este a doua cerință importantă a sistemelor de excitație și constă în suprimarea cîmpului creat de excitatoare printr-o instalație de dezexcitare rapidă. După deconectarea generatorului, cîmpul inductor al acestuia trebuie micșorat repede, atît încît tensiunea la bornele generatorului să scadă sub valoarea tensiunii de arc la locul defectului. Aceasta se obține în general dacă tensiunea la borne scade de la 100 % la 10%. Dezexcitarea rapidă se realizează prin scăderea tensiunii și a curentului de excitație al generatorului și începe din momentul înțirii rezistenței circuitului de excitație prin introducerea rezistenței de dezexcitare. Se determină apoi, timpul necesar scăderii tensiunii de excitație precum și viteza de micșorare a curentului de excitație de la valoarea nominală la zero, în funcție de procedeul de dezexcitare utilizat.

Opțiunea pentru o anumită schemă de dezexcitare se face pe baza criteriului obținerii unui timp cit mai scurt de dezexcita-

tare și în funcție de complexitatea instalației de deexcitare utilizate.

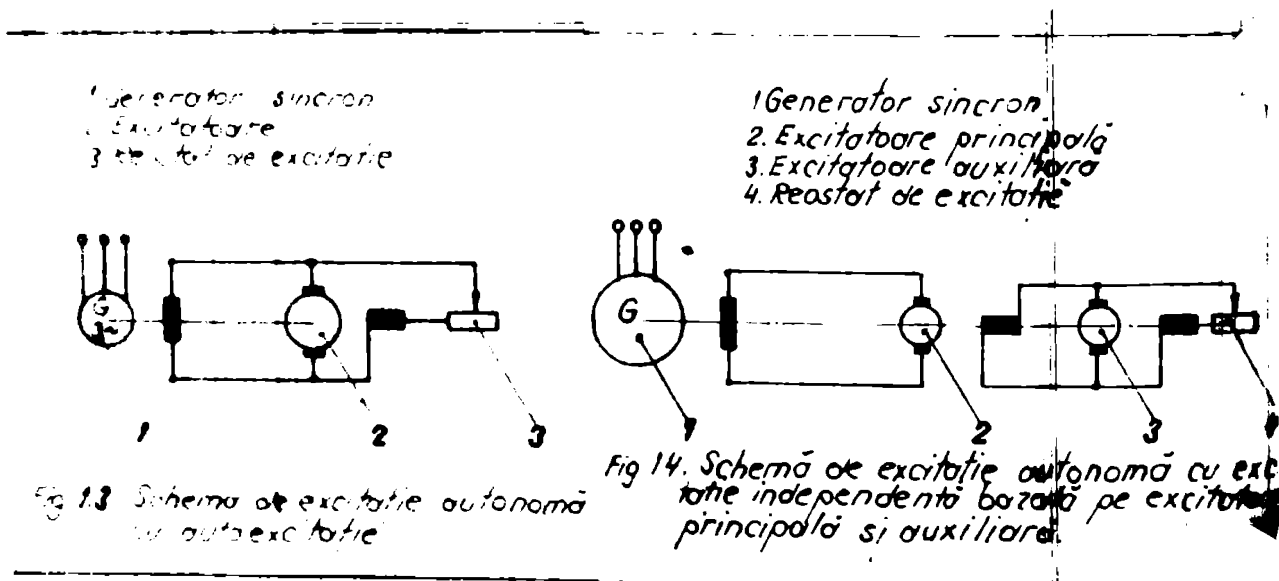
Eficiențata funcțională a sistemului de excitație se poate realiza numai pe baza unei corelări raționale a elementelor componente din sistem și a perfecționării în ansamblu a sistemului.

1.2. Forme și particularități ale sistemului de excitație clasic

Necesitatea realizării într-o măsură cât mai bună a proprietăților de bază ale sistemului de excitație au determinat apariția unei mari varietăți de scheme de excitație în cadrul sistemului clasic.

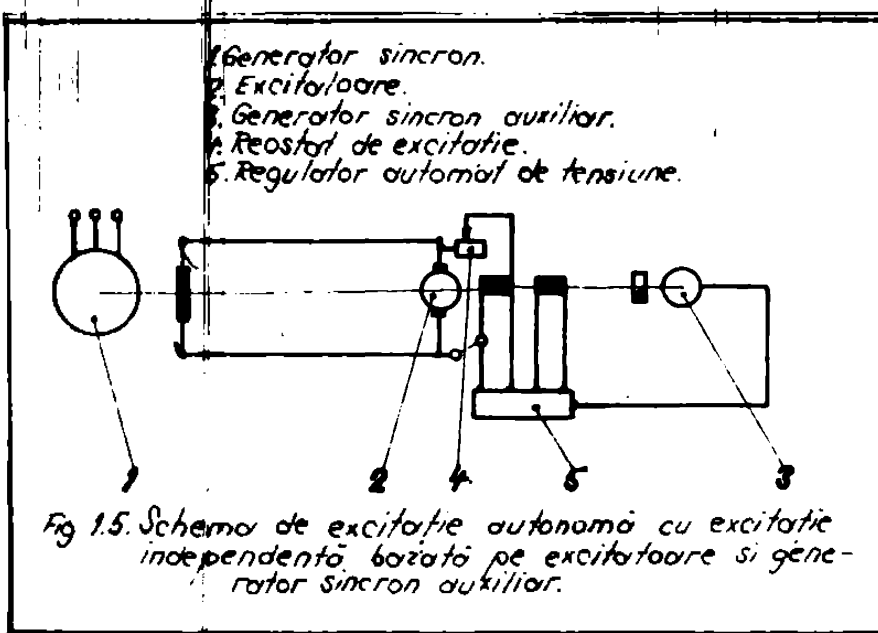
Astfel, în figura 1.3 se prezintă o schemă de excitație autonomă cu excitatoare autoexcitată montată pe un arbore comun. Reglarea tensiunii excitatoarei se realizează cu ajutorul unui reostat de excitație, iar forțarea excitației se face prin scurtcircuitarea sa. Această schemă se utilizează de obicei la generatoarele de mică putere și cu reglaj manual al excitației.

În cazul când sarcina generatorului sincron este reprezentată de o linie de transport și pentru generatoare sincrone mari se utilizează o schemă de excitație cu excitatoare principală și excitatoare auxiliară, sau subexcitatoare de curent continuu ca în figura 1.4.



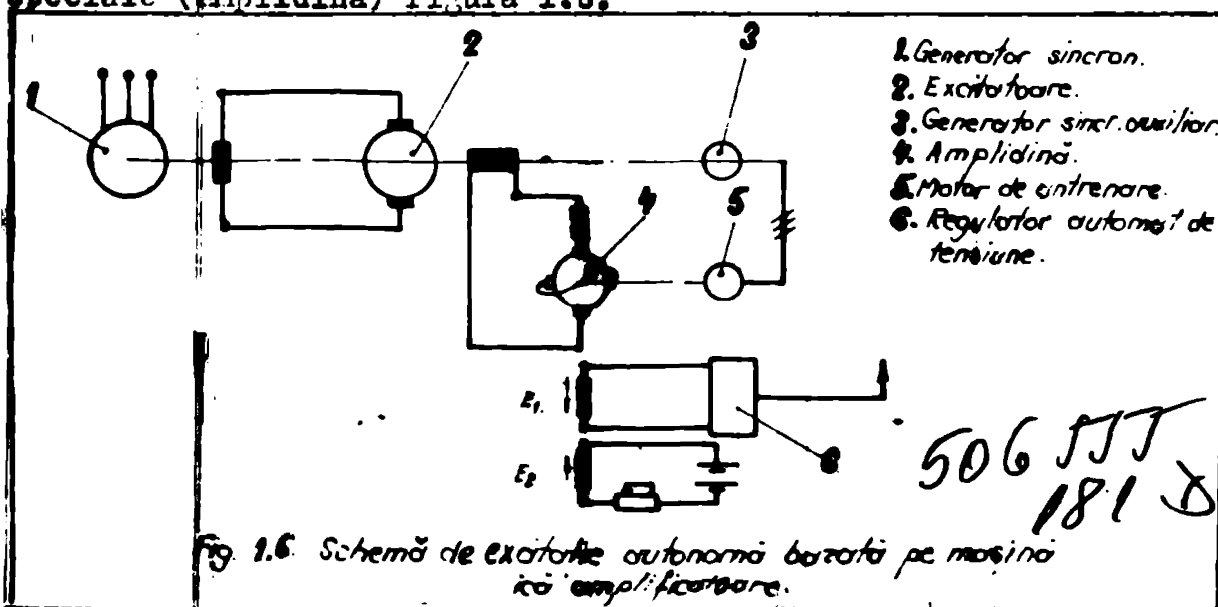
Această schemă de excitație prezintă avantajul de a avea stabilitate mare, deoarece excitatoarea auxiliară asigură la bornele înfășurării de excitație a excitatoarei principale o tensiune constantă independentă de sarcină. Schema prezintă însă și unele dezavantaje determinate de complexitatea ei, de posibilitatea mai mare de apariție a defectelor, de constanta de timp mai mare, precum și prin ocuparea unui spațiu mai voluminos.

În figura 1.5. se prezintă o schemă cu excitație independentă, alimentarea înfășurării de excitație a excitatoarei se realizează în acest caz de la un generator sincron auxiliar având rotorul cu magneți permanenți sau de la serviciile interne ale centralei, în care caz sistemul devine neautonom.



Regulatorul automat de tensiune asigură totodată redresarea curentului alternativ produs de generatorul cu magneți permanenți. Realizarea unui reglaj al tensiunii pînă la o valoare apropiată de zero, necesită o schemă de excitație mai complexă bazată pe mașini electrice

speciale (amplidină) figura 1.6.



Pe axul generatorului se află o excitatoare cu excitație independentă și un generator auxiliar cu magneti permanenți ce alimentează un grup separat motor sincron-amplidină, care reglează excitația excitatoarei.

Amplidina are înfășurarea de excitație propriuzisă "E2", iar înfășurarea "E1" alimentată de la bornele generatorului sincron prin intermediul unui redresor. Ca urmare fluxul amplidinei va fi: $\phi_A = \phi_{E1} - \phi_{E2}$. Când tensiunea generatorului sincron crește, rezultă că crește curentul în înfășurarea "E1" și fluxul ϕ_{E1} , iar fluxul amplidinei ϕ_A scade, deci va scădea tensiunea excitatoarei și curentul de excitație al generatorului sincron și deci tensiunea la borne. Invers se petrec fenomenele când tensiunea la bornele generatorului sincron scade.

Schemele de excitație din figurile 1.4, 1.5, 1.6, se folosesc în cazul generatoarelor de mare putere, sînt complexe avînd pe lîngă excitatoarea principală încă cîteva mașini, care pot constitui tot atîtea surse de avarie în exploatare și scumpesc instalația.

Pentru realizarea dezexcitării generatorului sincron în cadrul sistemului de excitație clasic cu excitatoare de curent continuu se utilizează diferite procedee dintre care amintim:

- Dezexcitarea prin slăbirea cîmpului excitatoarei, se realizează prin conectarea unei rezistențe "R" în circuitul de excitație al excitatoarei, figura 1.7, prin deschiderea întrerupătorului S 6, curentul de excitație al excitatoarei scade brusc.

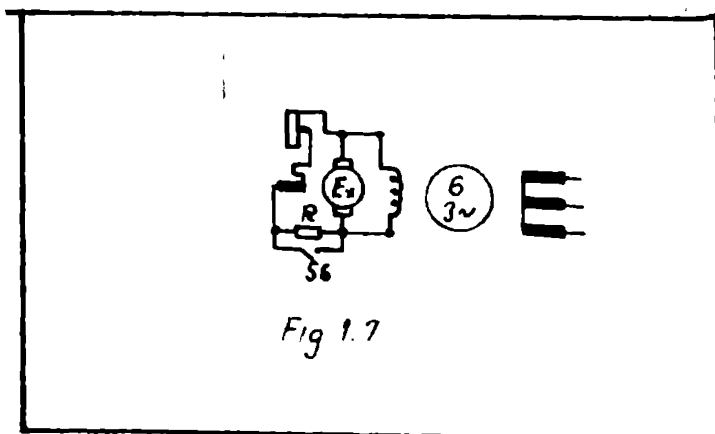
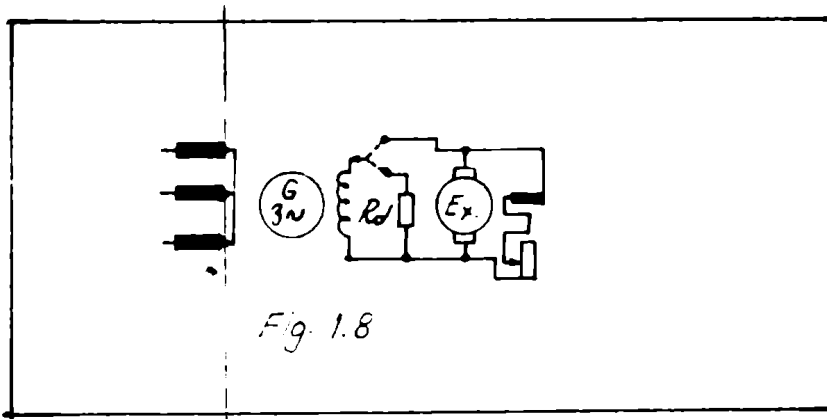


Fig 1.7

Timpul de dezexcitare, la acest mod de dezexcitare este ridicat, deoarece inductivitățile înfășurării de excitație și de amortizare ale generatorului sincron, cuplate cu fluxul inductor, acționează împotriva stingerii curentului de excitație. Con-

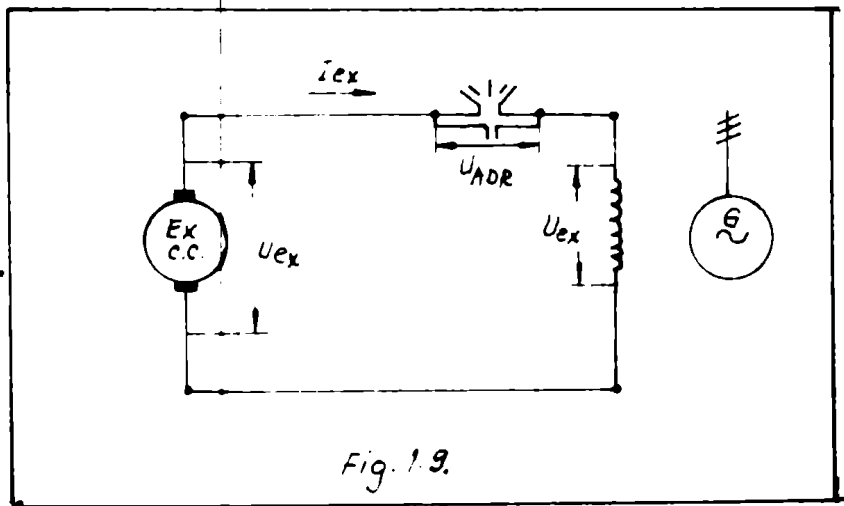
stanta de timp a procesului de stingere a cîmpului este egal cu suma constantelor de timp ale înfășurării de amortizare și de excitație. Tensiunea la bornele generatorului în această situație nu ajunge la zero stabilindu-se la tensiunea de aproximativ 10-15% din tensiunea nominală. Pentru a micșora constanta de timp a procesului de stingere se poate intercala în circuitul de excitație al generatoru-

lui sincron o rezistență de dezexcitare, figura 1.8 , iar printr-un întrerupător, circuitul de excitație se poate întrerupe față de excitatoare.



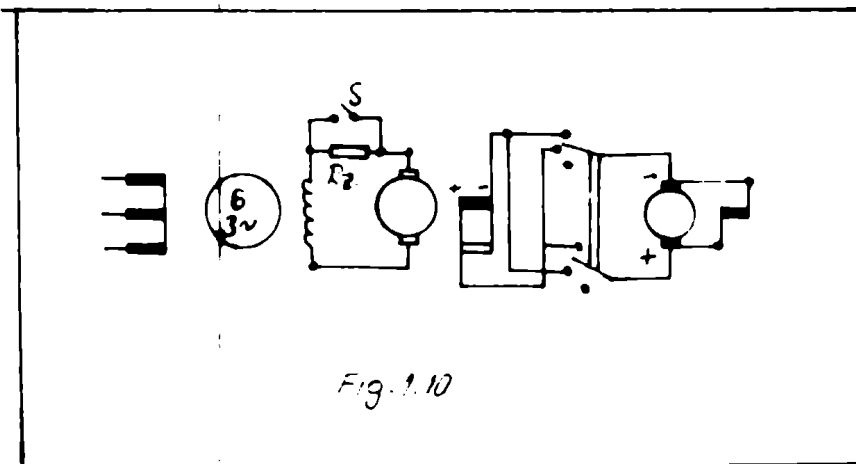
- Un procedeu modern constă dintr-un automat de dezexcitare (A.D.R) cu care se realizează disiparea energiei cîmpului inductor prin arc. Schema circuitului de alimentare a înfășurării

de excitație a generatorului sincron este prezentată în figura 1.9.



- Dezexcitarea rapidă la excitație cu excitatoare de curent continuu se poate realiza și prin inversarea sensului tensiunii excitatoarei, ceea ce duce la micșorarea timpului de dezexcitare și totodată la micșorarea

pericolului de apariție a unor supratensiuni care pot provoca străpungerea izolației inelelor colectoare și a înfășurării rotorice a generatorului (figura 1.10).



Acest procedeu se aplică la generatoarele mari, unde se poate schimba nemijlocit polaritatea excitatoarei principale cu ajutorul excitatoarei auxiliare. In acest scop se deschide întrerupătorul de

dezexcitare "S" și se introduce în circuitul rotoric al generatorului (G) rezistența "R_s". În același timp se schimbă polaritatea excitatoarei. În circuitul rotoric al mașinii sincrone se suprapun două procese, pe de o parte se stinge curentul de excitație inițial al generatorului sincron și pe de altă parte se produce un curent de sens contrar rezultat din tensiunea de polaritate schimbată. În momentul în care suma fluxurilor din înfășurarea de excitație a rotorii polare a generatorului atinge valoarea zero se deconectează excitația în sens invers. Cu cât este mai mare tensiunea inversă, cu atât generatorul sincron se dezexcită mai repede.

Sistemul de excitație clasic prezintă în special odată cu creșterea puterii de excitație o serie de neajunsuri constructiv funcționale dintre care amintim :

- a) elementele de transmitere a curentului din rotor pe partea fixă (colector, inele colectoare, perii, etc.) obțin dimensiuni tot mai mari;
- b) pierderile de frecare și de trecere cresc odată cu creșterea numărului de perii și a lungimii collectorului;
- c) problemele de comutație devin tot mai dificile de soluționate;
- d) randamentul excitatoarei și generatorului scade;
- e) solicitările din regimurile tranzitorii (forțare, viteză de excitație) impun supra-dimensionarea excitatoarei care devine greoaie și scumpă.

Din cauza acestor neajunsuri, la multe din construcțiile recente curentul continuu necesar excitației generatoarelor sincrone se obține prin redresarea curentului unei surse de tensiune alternativă într-un sistem de excitație static.

1.3. Scheme și particularități ale sistemului de excitație static

În general într-un sistem de excitație static (figura 1.11) distingem :

1. Blocul de producere al curentului continuu redresat (Bloc 1).

Aceasta se compune dintr-un transformator de excitație (T), care este un transformator de putere ce servește la alimentarea convertizorului static (R) constituit dintr-un ansamblu de tiristoare comandate prin regulatorul automat de tensiune (Bloc 2) montate în punte și care realizează redresarea curentului alternativ obținut de la transformatorul de excitație. Pentru mărirea sigu-

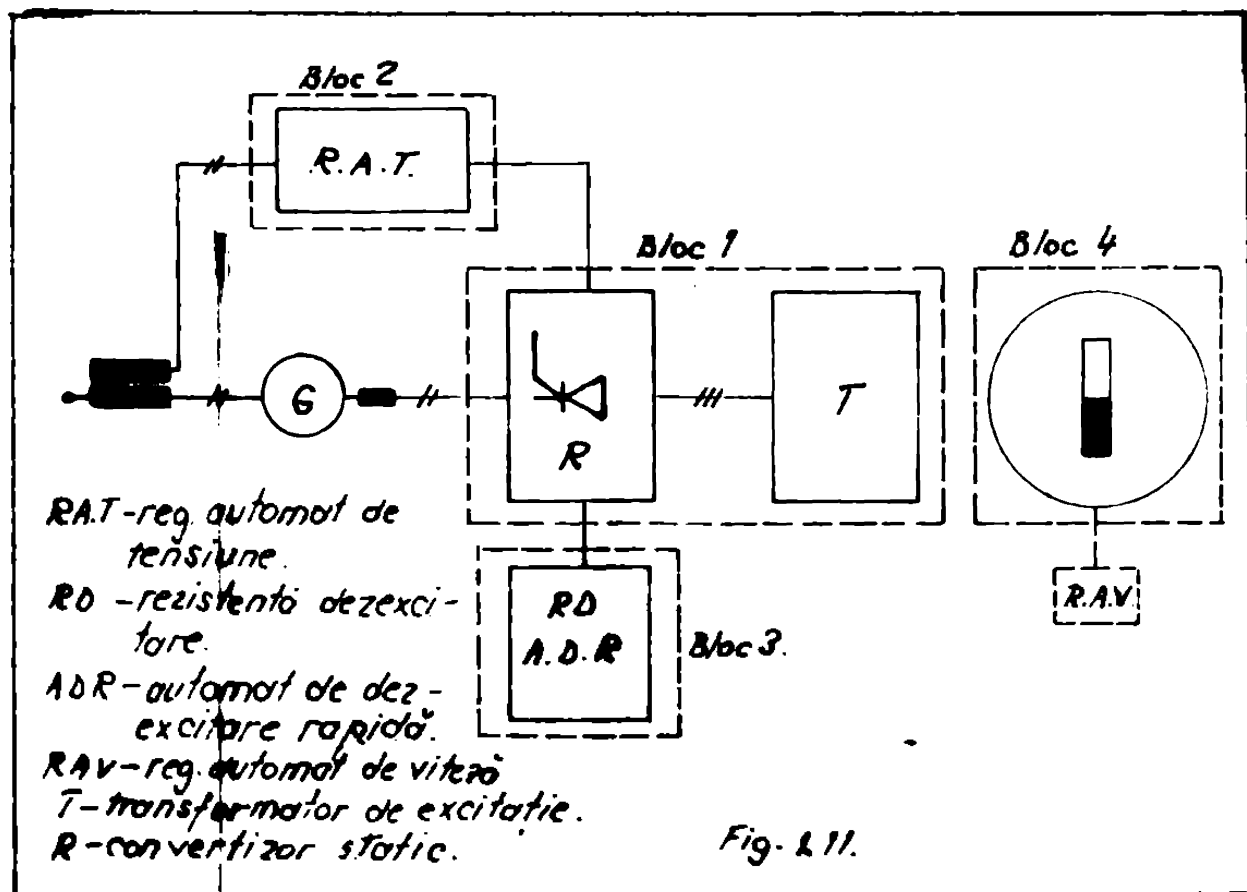
rantei în funcționare, convertizorul se realizează de obicei din două grupuri de tiristoare, unul asigurând regimul nominal numit și "grup de lucru" și celălalt pentru regimul de forțare numit și "grup de forțare".

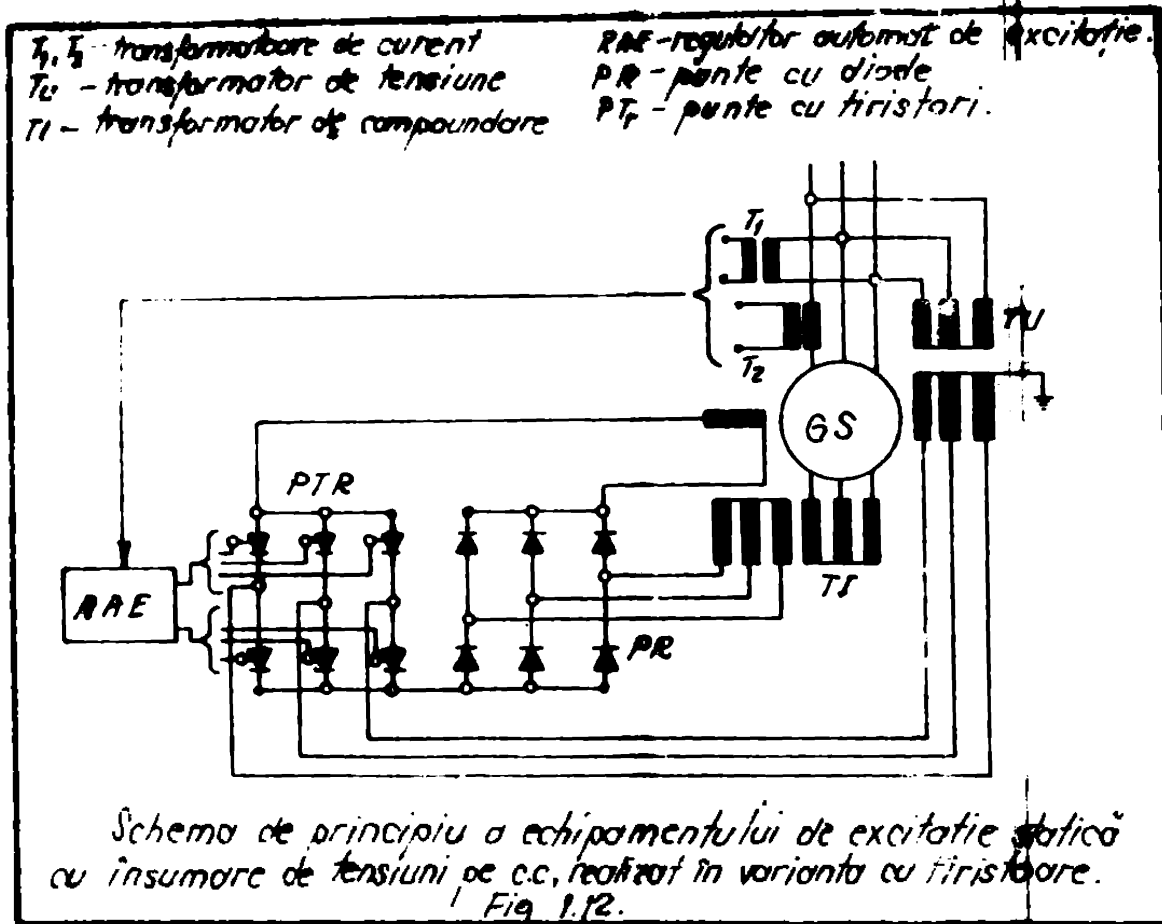
2. Blocul de reglaj și control al tensiunii ("B 2"). Acesta se compune dintr-un regulator automat al tensiunii ("RAT"), construit dintr-un ansamblu de elemente de automatizare destinat menținerii constante a tensiunii la bornele generatorului sincron, un reostat de reglaj manual al tensiunii, acționat prin servomotor și comandat prin RAT și un generator de impulsuri, care este un ansamblu ce realizează controlul unghiului de aprindere al tiristoarelor punții redresoare din circuitul de excitație al generatorului sincron.

3. Blocul de dezexcitare ("B.3") cuprinde rezistența de ținere a cîmpului și automatul de dezexcitare rapidă (ADR), care la primirea comenzii de dezexcitare realizează deconectarea rapidă a sistemului de excitație și disiparea energiei immagazinate.

4. Blocul de control al unghiului intern (B 4) este alcătuit dintr-un generator cu magneți permanenți, care realizează atât controlul unghiului intern cît și alimentarea regulatorului automat de viteză (RAV),

Dintre multiplele posibilități de realizare a unor scheme de excitație statică în figura 1.12 e prezentă o variantă de





excitație cu tiristoare și însumare pe partea de curent continuu.

În această schemă însumarea celor două componente ale curentului de excitație (dependente de tensiunea, respectiv de curentul statorului generatorului sincron GS) se efectuează pe partea de curent continuu, dar nu înainte de redresare. Astfel, transformatorul "TU" alimentează puntea cu tiristoare "PT_r", iar transformatorul de compoundare, "TI" puntea redresoare "PR" alcătuită din diode cu siliciu. În cadrul acestei scheme puntea "PT_r", nu furnizează decât o parte din puterea de excitație, care o completează pe cea produsă de redresorul cu siliciu "PR".

Această schemă prezintă avantajul că poate asigura static deexcitarea rapidă fără utilizarea automatului de deexcitarea "ADE" prin trecerea convertizorului cu tiristoare în regim de inverter.

Puntea cu tiristoare se compune din tiristoare conectate în paralel pe fiecare braț, protejate la supracurenți cu siguranțe rapide și la supratensiuni prin grupuri "R-C".

Comanda tiristoarelor este asigurată prin intermediul blocurilor de comandă pe grilă, prin generatoare de impuls care asigură o utilizare completă a punții cu tiristoare și posibilita-

tea unei treceri continue și rapide din regim de redresor în in-
vertor sau invers și prin urmare se obțin viteze de excitație
mari, precum și dezexcitarea rapidă a generatorului sincron. Acest
sistem de excitație există și în varianta de însumare de tensiuni
pe partea de curent alternativ.

Sistemele statice folosesc circuite pur statice de exci-
tație constând din transformatoare, bobine de reactanță și redre-
sare cu diode și tiristori. Calculul de dimensionare al schemelor
de redresare are un caracter particular, în sensul că solicitări-
le maxime ale schemei corespund regimului de forțare trebuie
comparate cu solicitările care decurg din regimurile perturbate
ale generatorului, iar dimensionarea se face pe baza solicitărilor
maximale. Blocurile de redresare se proiectează cu o rezervă de
minim 25% (se prevede posibilitatea înlocuirii elementelor defecte,
fără scoaterea din funcțiune a generatorului) și se protejează în-
potriva supratensiunilor, ce pot să apară, prin circuite "RC" mon-
tate în paralel cu elementele respective și împotriva supra-
curenților prin siguranțe fuzibile ultrarapide.

Sistemele statice de excitație au o serie de avantaje în
comparație cu excitatoarele de curent continuu: greutate redusă,
construcție simplă, modulară, lipsa pieselor mari în mișcare, di-
mensiuni reduse, nu necesită fundații speciale, nu necesită prac-
tic nici un fel de întreținere, au un randament tehnic și economic
ridicat, oferă posibilitatea folosirii unor sisteme de comandă mai
sensibile, mai rapide și mai exacte, acest lucru prezentând o deo-
sebită importanță.

Sistemul de excitație static elimină de asemenea o serie
de dezavantaje ale sistemului clasic cu excitatoare de curent con-
tinuu și anume: dispăr problemele de contactare, se evită pierderi-
le de frecare și de trecere pe colector; persistă însă și la acest
sistem legătura prin contacte alunecătoare (inle de contact-perii)
între redresorul static și înfășurarea de excitație a mașinii sin-
crons, însoțită de existența unor pierderi de loc neglijabile, pre-
cum și spațiul suplimentar și manevrările corespunzătoare ocupate
în centrală de către instalațiile statice îndeosebi în centrale
subterane.

Când cu creșterea regimului nominal stit la turbogenera-
toare și hidrogeneratoare, cât și la motoarele sincrone, se impune
ca o necesitate studierea și punerea la punct a unui sistem de exci-
tație viabil care să nu aibă nevoie de contacte alunecătoare (colec-
tor, inle de contact, perii) și care să asigure o înaltă siguranță
în funcționare să reducă la minim timpul de oprire pentru între-

ținere și agregatelor și să fie economice.

1.4. Sistemul de excitație cu excitatoare sincronă cu diode rotative

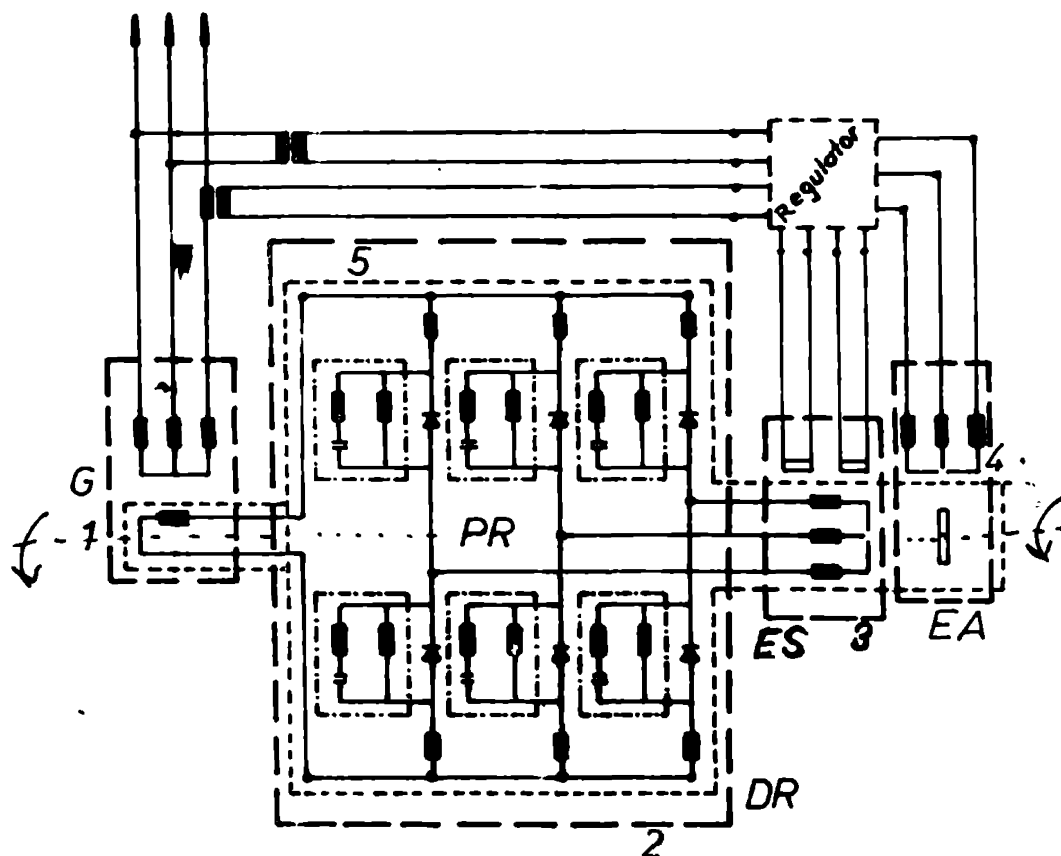
Încă prin sistemele statice de redresare se elimină colectorul și perile colectoare, reiese că pe lângă următoarele eliminări și a inelelor de contact și a periiilor sfabente, prin ceea ce, redresorul să se realizeze sub formă de redresor rotativ de un tip special, capabil de a furniza generatorului sincron cu curentul de excitație necesar.

Această idee conduce la construcția unui sistem de excitație fără nici un fel de perii, deci la un nou sistem de excitație diferit de cel pur static, format dintr-un generator sincron de excitație cuplat direct cu un redresor rotativ, montat pe același arbore și constituind un tot unitar.

Imperativul eliminării complete a contactelor alunecătoare devine necesar, în special în cazul generatoarelor de puteri mari, la care puterea de excitație crește mult, iar în condițiile în care tensiunea aplicată înfășurării de excitație a generatorului sincron este mult sub 1000 V, curenții de excitație sînt foarte mari (de ordinul miilor de amperi, de ex.: la o putere de 1000 MVA, curentul de excitație ajunge la 5000 A).

Pentru a transmite curenții de acest ordin de mărime, prin sistemul inele-perii, se necesită inele de contact cu sisteme de răcire deosebit de intensive, iar dimensiunile necesare ale contactului perii de cărbune-inel duc la creșteri dimensionale deosebite, cu toate neajunsurile legate de pierderile de contact, sensibilitatea, de tipul periei și altele.

Ideea realizării unor sisteme de excitație fără nici un fel de contacte alunecătoare este mai veche, dar numai introducerea pe scară largă a semiconductorilor de forță (în special diode cu siliciu, cu insensibilitatea lor mecanică și posibilitățile mari de încălzire) a deschis drumul utilizării pe scară largă a sistemelor de excitație cu excitatoare sincronă și redresor rotativ. Excitatorul sincron cu redresor rotativ se poate aplica la toate mașinile sincrone mergînd pînă la cele mai mari unități realizate în prezent.



SCHEMA DE PRINCIPIU A EXCITAȚIEI CU EXCITATOARE SINCROŢĂ CU DIODE ROTATIVE

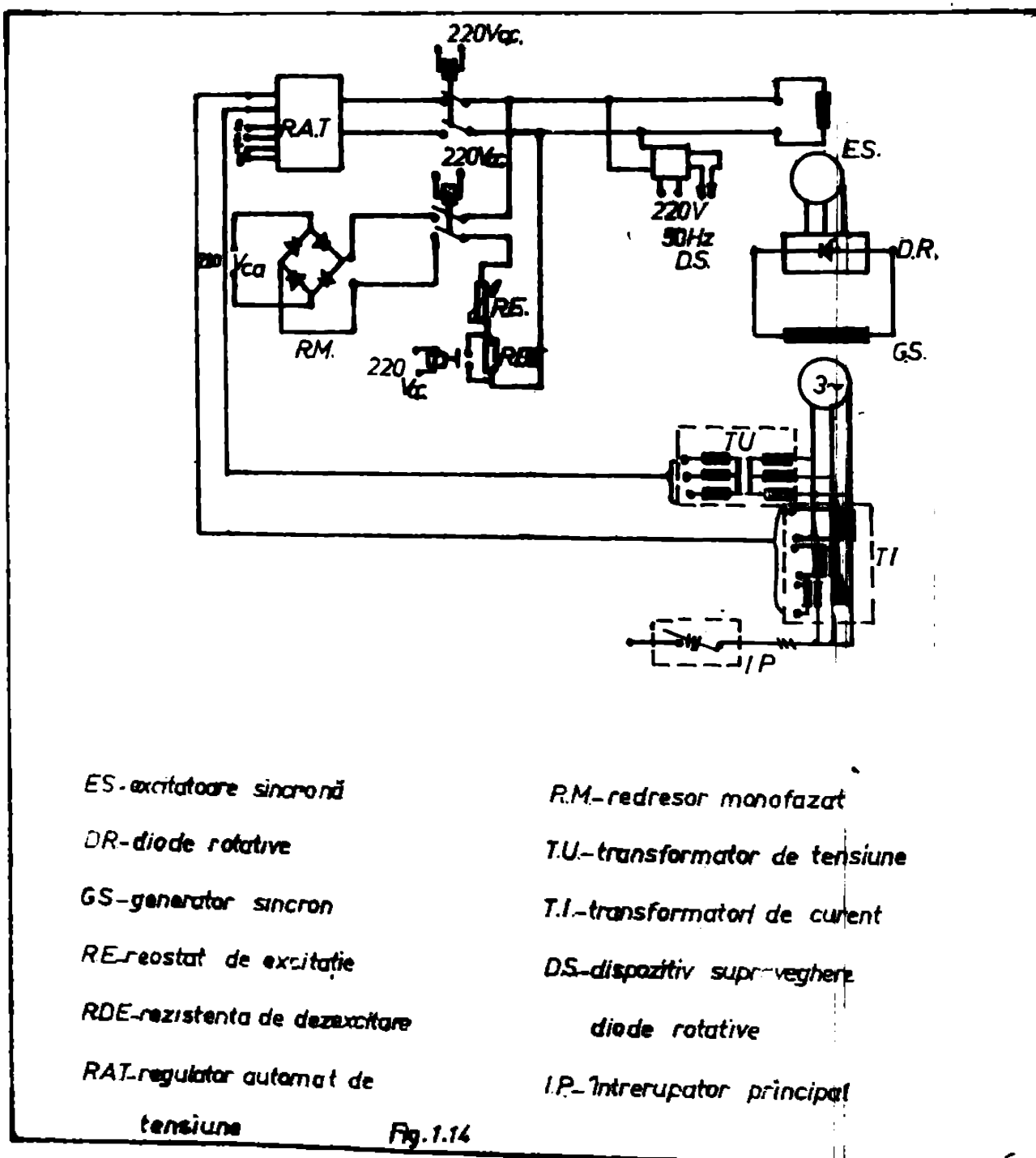
- 1 Generator - G
- 2 Punte redresoare cu diode rotative - DR
- 3 Excitatoare sincronă (principală) - ES
- 4 Excitatoare auxiliară cu poli permanenți - EA
- 5 Parte rotitoare - PR

Fig. 1.13

In figura 1.13 se prezintă o schemă de principiu a sistemului de excitație cu excitatoare sincronă cu redresor rotativ. O excitatoare tri azată cu poli permanenți (4) alimentează, peste un regulator automat de tensiune, înăşurarea de excitație din stator a unei excitatoare sincrone (3). Această construcție inversată a excitatoarei sincrone (3), cu statorul inductor cu poli permanenți

iar rotorul îndus, oferă posibilitatea alimentării directe, peste un sistem de redresare montat solidar pe rotor, a înfăşurării de excitaţie a generatorului principal (1).

Tensiunile induse în rotorul excitatoarei (3) sînt redresate printr-o punte (2) care cuprinde pe lîngă diodele cu siliciu, un grup de protecţie la supratensiuni, format din condensatoare şi rezistenţe şi la supracurenţi format din siguranţe fuzibile rapide, precum şi două inele de redresare, unul de polaritate pozitivă şi celălalt negativă (reprezentate în figura 1.13) care alimentează înfăşurarea rotorică (de excitaţie a generatorului sincron principal) (1).



Curentul redresat de la inelele instalației de redresare este condus cu ajutorul unor bare sau conductorii de legătură la înfășurarea de excitație a rotorului generatorului (1).

Înfășurarea de excitație a generatorului (1), puntea redresoare (2), indusul excitației principale (3) și inductorul excitației auxiliare (4) constituie împreună partea rotitoare (5) a instalației din figura 1.13.

Schema de excitație din figura 1.13 realizează autonomia generatorului față de surse de tensiune străine, cu ajutorul excitației auxiliare cu magneti permanenți în rotor.

În figura 1.14 se prezintă o schemă de excitație la care înfășurarea de excitație a generatorului sincron (GS) este alimentată de la o excitație sincronă cu diode rotative (ES) (DR). Regimul de bază de funcționare al generatorului sincron este cu reglaj automat al tensiunii, printr-un regulator automat de tensiune (RAT), care alimentează înfășurarea de excitație a excitației sincrone (ES).

În afara acestui regim de bază, mai este prevăzut un regim de rezervă, cu reglarea curentului de excitație al excitației printr-un reostat de excitație (RE) și alimentarea excitației excitației de la serviciile interne ale centralei electrice printr-un redresor (R.N.). În această schemă mai este prevăzută o rezistență de dezexcitare a excitației (RDE) și un dispozitiv de supraveghere și semnalizare a defectării diodelor din redresorul rotativ (DS).

În cadrul acestei scheme, pentru ambele regimuri de funcționare, de bază și de rezervă este necesară tensiunea de la serviciile auxiliare ale centralei pentru asigurarea excitației generatorului.

Sistemul de excitație cu excitație sincronă cu redresor rotativ constituie o alternativă care se impune prin avantajele pe care le prezintă. Astfel, crește randamentul agregatului, prin eliminarea pierderilor prin contacte alunecătoare, se obține o reducere a dimensiunilor mașinii, în special a lungimii, contribuind la reducerea cheltuielilor de investiții pentru executarea centralei. Problemele de execuție ale excitației sincrone se simplifică în comparație cu o excitație de curent continuu, de asemenea se reduce consumul de cupru, (înlocuirea colectorului) crescând indicele de utilizare al acestuia. Lucrările de întreținere a excitației în exploatare se elimină. Greutatea excitației sincrone cu redresor rotativ este mai mică decât cea a unei excitații de curent continuu de aceeași putere, contribuind astfel

la reducerea consumului de metal, respectiv scăderea prețului de cost.

Parametrii funcționali ai excitatoarei sincrone cu diode rotitoare (factor de forțare, viteză de excitație) sînt comparabili cu cei ai excitatoarei de curent continuu.

Un aspect dezavantajos este cel referitor la dezexcitarea rapidă în caz de avarie, care nu se poate face prin intercalarea unei rezistențe în circuitul rotoric al generatorului principal sau schimbarea polarității tensiunii de excitație, (sistemul inele-perii s-a eliminat) ci doar prin slăbirea cîmpului excitatoarei sincrone, prin intercalarea unei rezistențe de dezexcitare în circuitul înfășurării de excitație sau prin anularea cîmpului excitatoarei cu ajutorul regulatorului automat de tensiune, prin trecerea acestuia în regim de invertor; dar timpul de dezexcitație în acest caz este mai lung, deoarece nu se micșorează constanta de timp a procesului de stingere a cîmpului generatorului sincron principal.

Dacă se necesită, în cazuri speciale, timpi scurți de dezexcitare acest sistem de excitație se prevede cu un mutator rotativ cu tiristoare, care se trece în regim de invertor pentru stingerea cîmpului rotoric.

Măsurarea tensiunii și curentului de excitație al generatorului principal constituie de asemenea un aspect dezavantajos, necesitînd utilizarea în acest scop a sistemelor cu scheme microelectronice și logice, sau dispozitive de măsură speciale, de tip perii-inele și sunt rotativ, care se îndepărtează după măsurători.

Tendința pe plan mondial în domeniul sistemelor de excitație este: de renunțare la excitatoarea de curent continuu și înlocuirea ei cu excitatoarea sincronă cu redresor rotativ în domeniul turațiilor ridicate și mijlocii, unde excitatoarea sincronă are greutatea considerabil mai mică și randamentul mai mare decît excitatoarea de curent continuu, iar pentru mașinile cu turații joase, utilizarea sistemelor de excitație statică, deoarece mașinile electrice sînt mai mari și grele.

Sistemul de excitație cu excitatoare sincronă cu redresor rotativ merită să fie luat în considerare practic și perfecționat din punct de vedere constructiv și funcțional pentru a fi folosit atît la excitarea hidrogenatoarelor și a turbogeneratorilor cît și la excitarea motoarelor sincrone.

Capitolul II

CONSTRUCTIA SI FUNCTIONAREA IN SERVICIU A EXCITATORII SINCRONE CU REDRESOR ROTATIV CU DIODE

2.1. Construcția excitatoarei sincrone cu redresor rotativ cu diode

Excitatoarea sincronă cu redresor rotativ cu diode este un generator sincron de construcție inversată, adică cu indușul în rotor, în statorul inductor cu poli sperenți, pe care este plasată înfășurarea de excitație (figura 2.1).

Statorul excitatoarei se compune din carcasă, poli, bobinajul de excitație, bornele și cutia de borne.

Carcasa este executată dintr-un pachet inelar, format din segmente de tablă de oțel grosă de 1 mm. Soluția de realizare a jugului statoric inelat asigură o anumită omogenitate a circuitului magnetic. Pachetul de tole este cuprins între două plăci de presare. Stringerea plăcilor de presare se face cu ajutorul unor buloane care se sudează în locașurile din aceste plăci, după terminarea presării finale. Totul este montat într-un schelet metalic și închis în exterior cu o manșă de închidere și un scut de scoprire.

De carcasă se fixează poli, prin organe de asamblare mecanice demontabile. Poli sunt confecționați din tole silicioase sau din tablă de oțel. Forma polilor este corespunzătoare unor circuite magnetice cu pierderi minime, iar forma tălpii polare ține cont de dispersia ce are loc în interior. Pachetele de tole se asamblează mecanic prin nituire, după ce în prealabil au fost presate.

Bobinajul de excitație se montează pe poli stator. Înfășurarea de excitație este de tip concentrat, realizat din spire de cupru de secțiune dreptunghiulară. În cazul unui număr mare de spire, înfășurarea se divide în guleți, între care se montează rame de ventilație metalice. Între doi poli cu bobinele montate trebuie să rămână spațiu liber pentru trecerea aerului de ventilație.

De carcasa excitatoarei se montează placa de borne pe care se găsesc bornele de alimentare a înfășurării de excitație, precum și bornele pentru măsurarea tensiunii redresate și a curen-

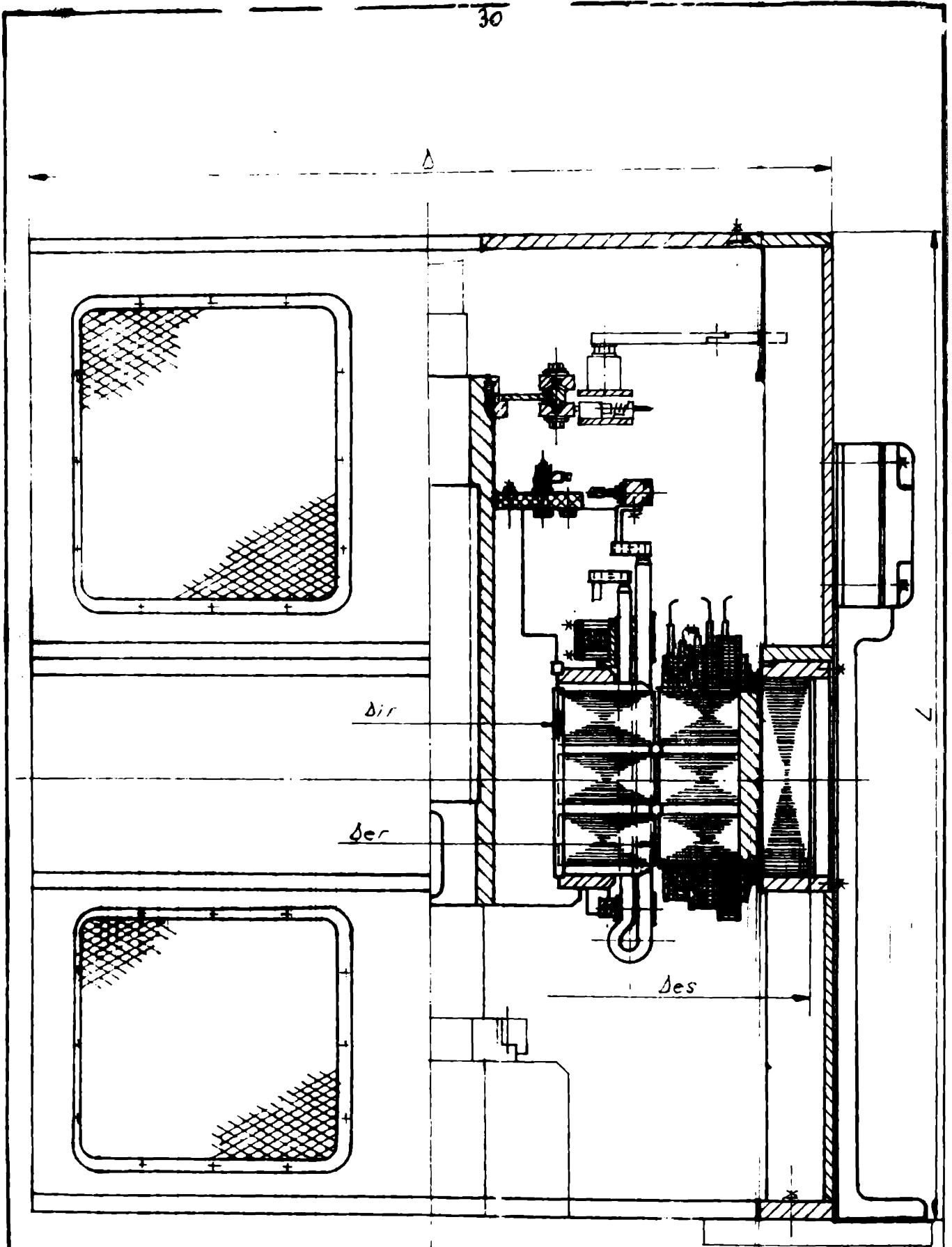


Fig 2^a Excitatoare sincronă cu diode relative

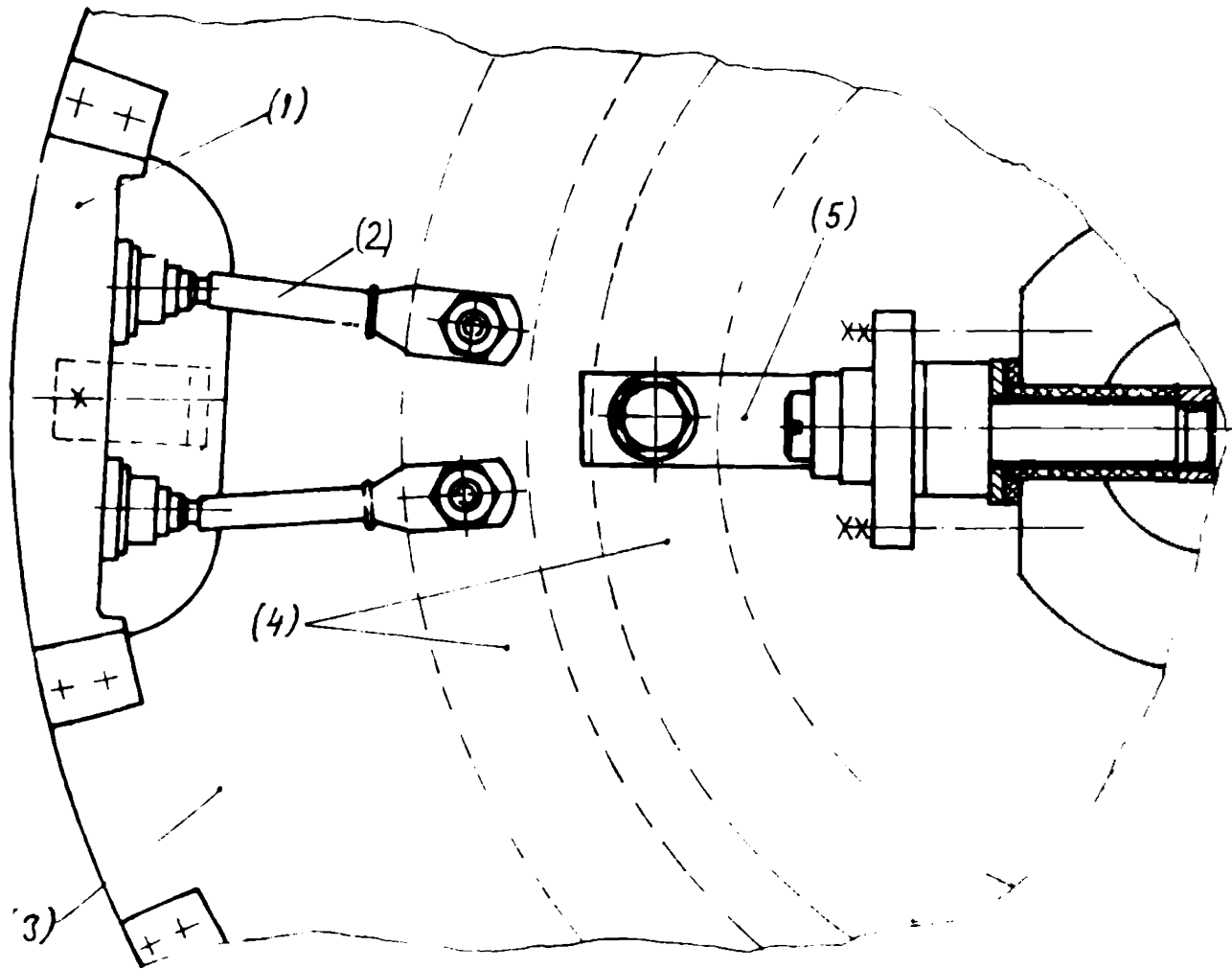
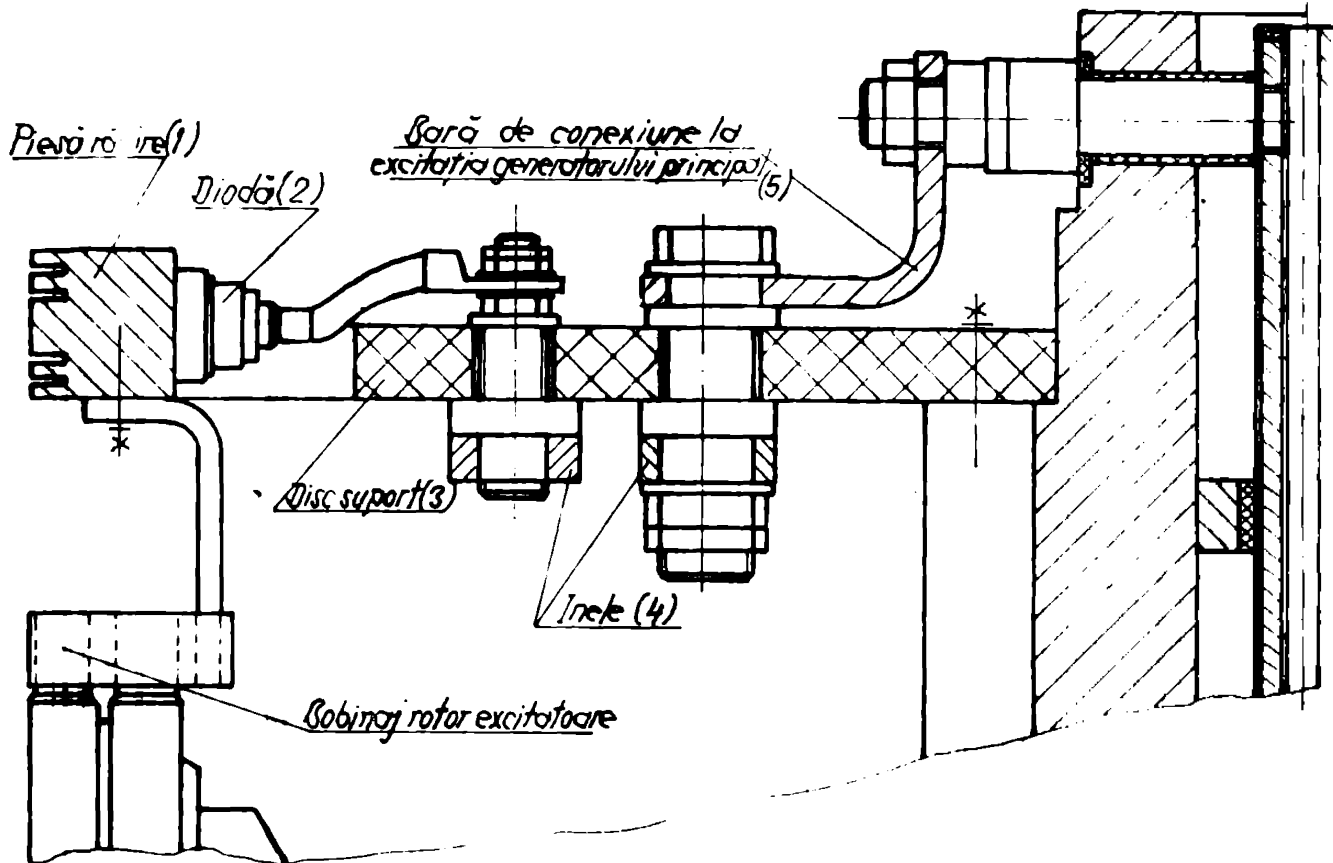


Fig 2.2. Instalație de rectificare cu diode rotative

tului rotoric. Cutia de borne turnată este montată pe carcasă și acoperă placa de borne.

În ceea ce privește rotorul mașinii se distinge un miez feromagnetic, prevăzut cu o înfășurare, care se conectează la un redresor rotativ de tip special, montat pe arborele sau butucul rotorului excitatoarei.

Rotorul este constituit din tole electrotehnice de grosime 0,5 mm, izolate între ele și formând pachete de tole de 45-55 mm grosime, între care se găsesc canale de ventilație radiale. Pe periferia exterioară a miezului sînt practicate creșturile rotorice în care este plasată înfășurarea rotorică. Miezul feromagnetic rotoric este montat, prin intermediul unor coaste, pe butucul care se montează pe arborele excitatoarei sau al generatorului sincron principal. Înfășurarea rotorică este un bobinaj de tip ondulat, în două straturi avînd bobinele închise pe partea opusă legăturilor spre redresorul rotativ, și asigurate împotriva forței centrifuge în creștături cu pene, iar la capete cu un bandaj corespunzător.

Instalația de redresare cu diode rotative este astfel concepută, încît să permită constructiv cuplarea cu indusul excitatoarei sincrone și cu înfășurarea de excitație a generatorului sincron principal, cum se observă în figura 2.2. Aceasta este constituită în principal, fie dintr-un disc din sticlostratitex (3), fixat pe coastele butucului rotor al excitatoarei cu organe de asamblare demontabile (șuruburi, șaibe), fie dintr-o bucsă metalică fixată pe arborele excitatoarei; acest ansamblu are concentrată pe el toată partea electronică ce constituie circuitul de forță rotativ al sistemului de excitație.

Pe discul portant sînt montate radial în decupri frezate special, ansamblu de răcire rotative (1) echipate cu semiconductoarele de curanți tari (diode cu siliciu (2)), corespunzător topologiei circuitului de forță rotativ. Tot pe disc se află montate circuitele de protecție și măsură pe partea de curent continuu.

Conexiunile de forță, între bobinajul rotoric al excitatoarei și redresorul rotativ sînt executate din bare de cupru avînd forme adecvate poziției de montaj. Conexiunile ce traversează discul portant sînt executate din buloane sau șuruburi de alamă și prevăzute cu piulițe asigurate la degurubare.

Fixarea ansamblelor de răcire rotative din aluminiu pe discul portant se realizează cu ajutorul a două șuruburi cu cap hexagonal și piulițe asigurate împotriva defacerii.

Inelele de conexiune (4), servesc la concentrarea legăturilor de polaritate plus, respectiv minus, venind de la elemente-

le semiconductoare de putere din circuitul redresor rotativ și la conectarea înfășurării de excitație a generatorului sincron principal (5).

Pentru măsurarea curentului rotoric al generatorului sincron principal, pe partea rotativă se poate monta un șunt între două inele de conexiune de aceeași polaritate. Legăturile de la acest șunt se pot scoate la un bloc de inele de măsură montate pe butucul excitatoarei.

Schemele de redresare utilizată la realizarea redresorului rotativ cu diode sînt în principal: cu comutație paralel dublu (în punte trifazată cu dublă redresare) și în serie, iar corespunzător înfășurarea rotorică a excitatoarei sincrone este conectată în stea trifazată sau în poligon.

2.2. Studiul critic al tipurilor de înfășurări de indus ale excitatoarei sincrone

Înfășurarea indusului excitatoarei sincrone cu diode rotative, fiind amplasată în rotor trebuie să fie o înfășurare perfect simetrică și cu cît mai puține conexiuni între grupele de bobine ce constituie o fază.

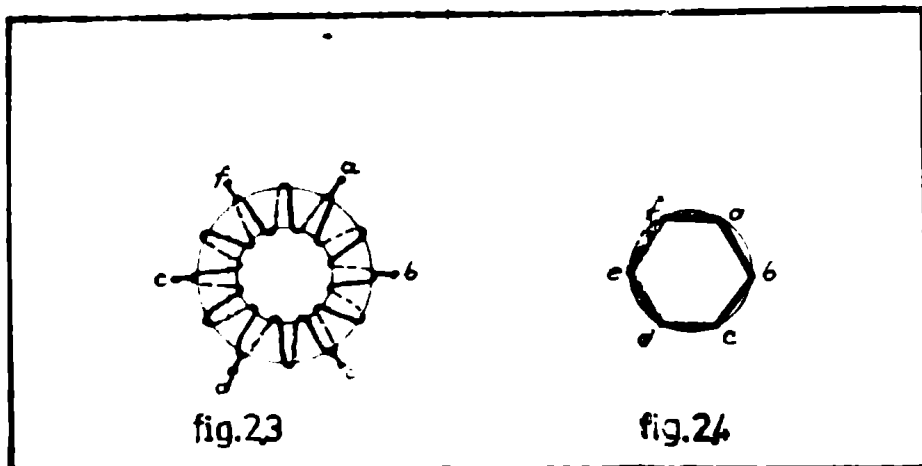
În funcție de modul de redresare utilizat excitatoarea sincronă se prevede cu unul din următoarele tipuri de înfășurări ale indusului:

- A - înfășurarea hexafazată, cu fazele grupate și conectate astfel, încît să se obțină o înfășurare trifazată în stea;
- B - înfășurare în poligon cu un număr impar de faze destul de redus (7 sau 9);
- C - înfășurare în poligon cu un număr mare de faze.

A. Deoarece înfășurările trifazate obișnuite de curent alternativ prin structura lor, necesită o serie de conexiuni frontale repartizate neuniform pe periferia rotorului, ceea ce creează dificultăți constructiv funcționale și pe de altă parte pentru a reduce reactanța de dispersie diferențială, se preferă o înfășurare obținută dintr-o înfășurare de curent continuu secționată în șase puncte de incizie echidistante, rezultînd 6 faze independente care se conectează în șase fel, încît să rezulte o înfășurare trifazată în conexiune stea.

Considerăm o înfășurare de curent continuu secționată în șase puncte, reprezentată în figura 2.3 careia îi corespunde

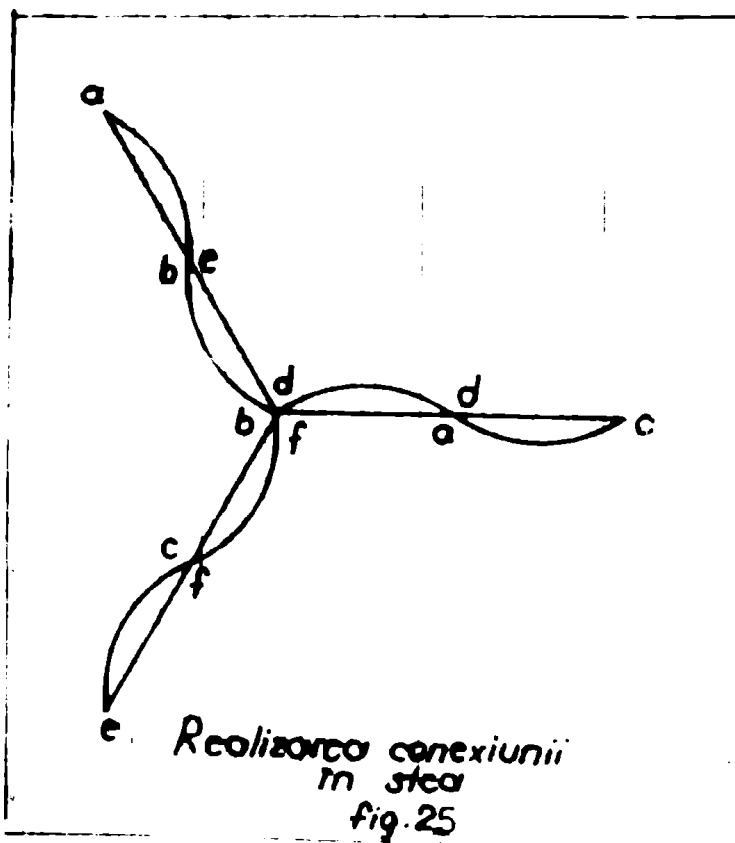
diagrame tensiunilor din figura 2.4.



Se obține astfel o înfășurare hexafazată, conectată în 6 puncte având factorul de înfășurare:

$$K_w = \frac{\text{coardă}}{\text{arc}} = \frac{2 \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{3}} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \quad (3)$$

O înfășurare trifazată la fel de bine utilizată ca cea de mai sus rezultă dacă în punctele de incizie: a, b, c, d, e, f, înfășurarea se secționează, se desface și ramurile ei se leagă în serie obținându-se trei faze care se conectează în stea așa cum se indică în figura 2.5.



În această figură se reprezintă diagrama tensiunilor în cazul conexiunii în stea și al legării în serie a ramurilor de înfășurare aparținând aceleiași faze.

Analizăm cazul înfășurării secționată în 6 puncte și conectată trifazat, la care legăturile între ramurile înfășurării sînt de aceeași parte a indușului. Pentru ca cele 3 faze ale înfășurării să aibă același număr de spire, la înfășurarea în două straturi

este necesară îndeplinirea condiției:

$$\frac{Z}{3} = \text{întreg} \quad (4)$$

unde Z - este numărul de creștături rotorice. Această condiție poate fi îndeplinită pentru toate perechile de poli care nu sînt divizibile cu 3. Punctele de incizie și secționare "a .. f" ale înfășurării se obțin în mod diferit în funcție de faptul, dacă numărul de creștături îndeplinește una din condițiile:

$$\frac{Z}{3} = \text{par} \quad (5)$$

sau $\frac{Z}{3} = \text{impar} \quad (6)$

În cazul în care este îndeplinită condiția (5), pentru a ajunge la punctele de secționare ale înfășurării, trebuie numărate cîte $Z/6$, laturi de bobine succesive, iar pasul ce trebuie realizat pentru a ajunge de la un punct de secționare la următorul este:

$$y_4 = \frac{Z}{6} y \quad (7)$$

În cazul în care este îndeplinită condiția (6) se vor respecta alternativ pașii:

$$y_{s1} = \left(\frac{Z}{6} + \frac{1}{2}\right)y \quad \text{și} \quad y_{s2} = \left(\frac{Z}{6} - \frac{1}{2}\right)y \quad (8)$$

pentru a ajunge la punctele de secționare ale înfășurării. Pașii calculați cu relațiile (7) și (8) sînt în general mai mari decît numărul de creștături Z . De aceea pentru a determina punctele de secționare nu se vor număra " y_s " spire pe periferia indusului, ci doar surplusul de " y_s " spire peste un multiplu întreg de creștături " Z ".

Pentru ca tensiunea electromotoare indusă să fie cît mai mare, pasul înfășurării se alege în general cît mai apropiat de pasul diametral, astfel încît factorul de înfășurare să fie în general mai mare decît 0,9. Pasul înfășurării este:

$$y = 2Z = \frac{Z \pm a}{p} \quad (9)$$
$$y = y_1 + y_2 ; \quad y_1 = \frac{5}{6} \frac{y}{2}$$

Pașii de înfășurare se adoptă astfel, încît prin intermediul factorului de scurtare $k_y = \sin \frac{\alpha}{2}$ (unde $\beta = \frac{\alpha}{2}$ - reprezintă scurtarea înfășurării), să se obțină un factor de înfășurare " k_w " al indusului cît mai mare.

Pentru exemplificarea celor expuse mai sus vom considera înfășurarea indusului unei excitatoare sincrone, avînd următo-

toarele date principale: numărul de creștături $Z=69$; numărul de perechi de poli $p=4$ și conexiunea stea trifazată. Elementele înfășurării de tip ondulat în două straturi determinate cu relațiile de mai sus sînt:

$$x = 2z = \frac{69 - 1}{4} = 17; \quad y = y_1 + y_2 = 8 + 9; \quad \beta = 0,94$$

Întru reprezentarea schemei de bobinaj (figura 2.6) se verifică condițiile (4, 5, 6):

$$\frac{Z}{3} = \frac{69}{3} = 23 - \text{întreg impar}$$

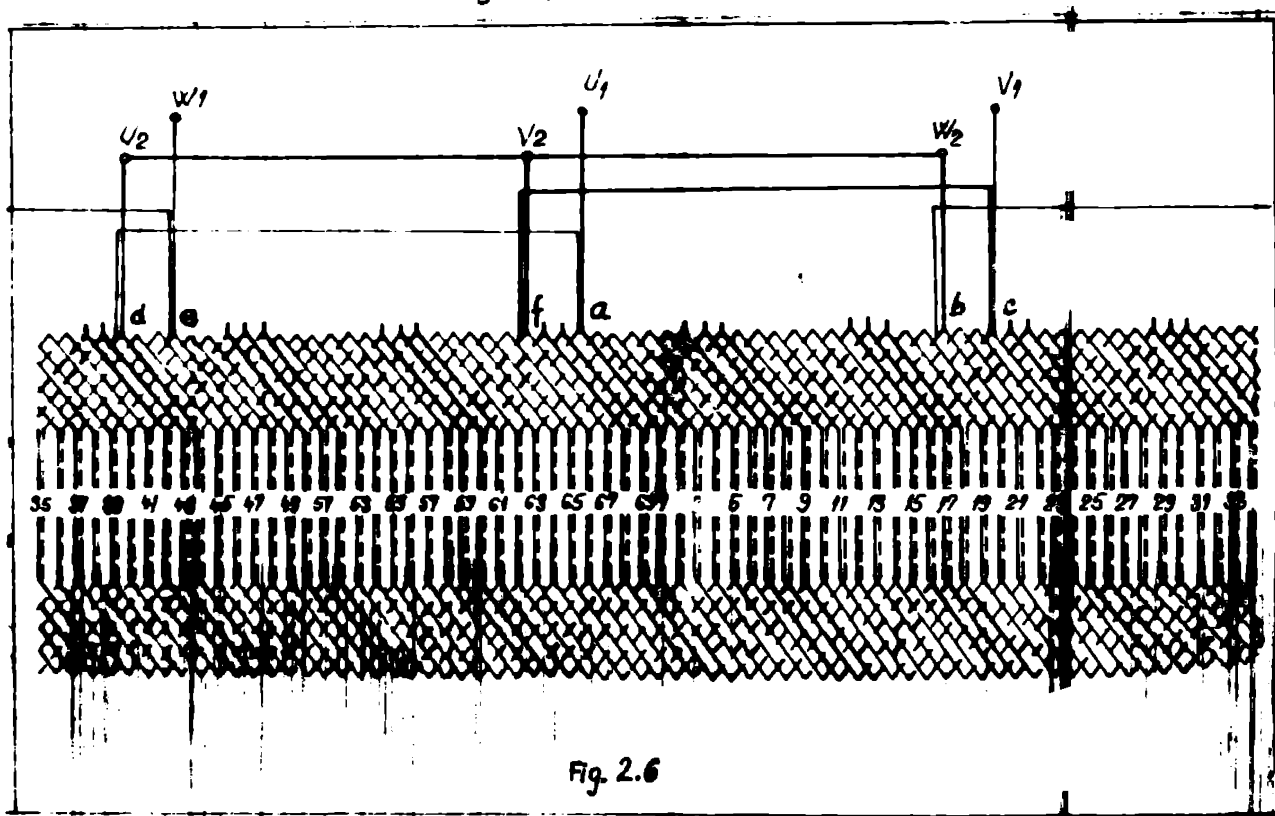


Fig. 2.6

Punctele de secționare ale înfășurării notate "a..f" în figura 2.6 se obțin în acest caz cu relațiile (8):

$$y_{s1} = \left(\frac{69}{6} + \frac{1}{2}\right)17 = 204$$

$$y_{s2} = \left(\frac{69}{6} - \frac{1}{2}\right)17 = 187$$

Deoarece valorile pentru y_{s1} și y_{s2} sînt mai mari decît numărul de creștături Z , se va număra începînd cu creștătura numărul 1, surplusul de $y_{s1} = 66$ ($\frac{204}{69} = 3$ rest 66) spire apoi, $y_{s2} = 49$ spire ($\frac{187}{69} = 3$ rest 49) și în continuare în mod alternativ pînă la obținerea celor 6 puncte de secționare notate în schema din figura 2.6. cu literele a, b... f.

Capetele de bobine secționare și notate cu literele a..f

se vor conecta apoi așa cum se arată în figura 2.5, obținându-se cele 3 faze ale căror început și sfârșit s-a notat în schema din figura 2.6 cu literele $U_1, U_2, V_1, V_2, W_1, W_2$. Sfârșitul celor 3 faze U_2, V_2, W_2 se conectează împreună, constituind nulul stelei, iar începuturile fazelor U_1, V_1, W_1 se conectează în instalația de redresare cu diode rotative.

Pentru realizarea constructivă a conexiunilor ce apar în schema de înfășurare din figura 2.6, respectiv a legăturilor dintre cele două ramuri aparținând aceleiași faze, precum și conectarea începuturilor de sfârșit ale fazelor, în vederea obținerii conexiunii în stea, s-a optat pentru o soluție, constând în inele de conexiune izolate, suprapuse așezate sub capătul frontal al înfășurării, din partea redresorului cu diode rotative. În figura 2.7 se arată cum se realizează practic conexiunile schemei de înfășurare din figura 2.6, prin intermediul a 4 inele de conexiune, dintre care 3 servesc pentru realizarea legăturilor dintre cele două ramuri inseriate (figura 2.5), aferente fiecărei faze și unul pentru realizarea conexiunii în stea a înfășurării.

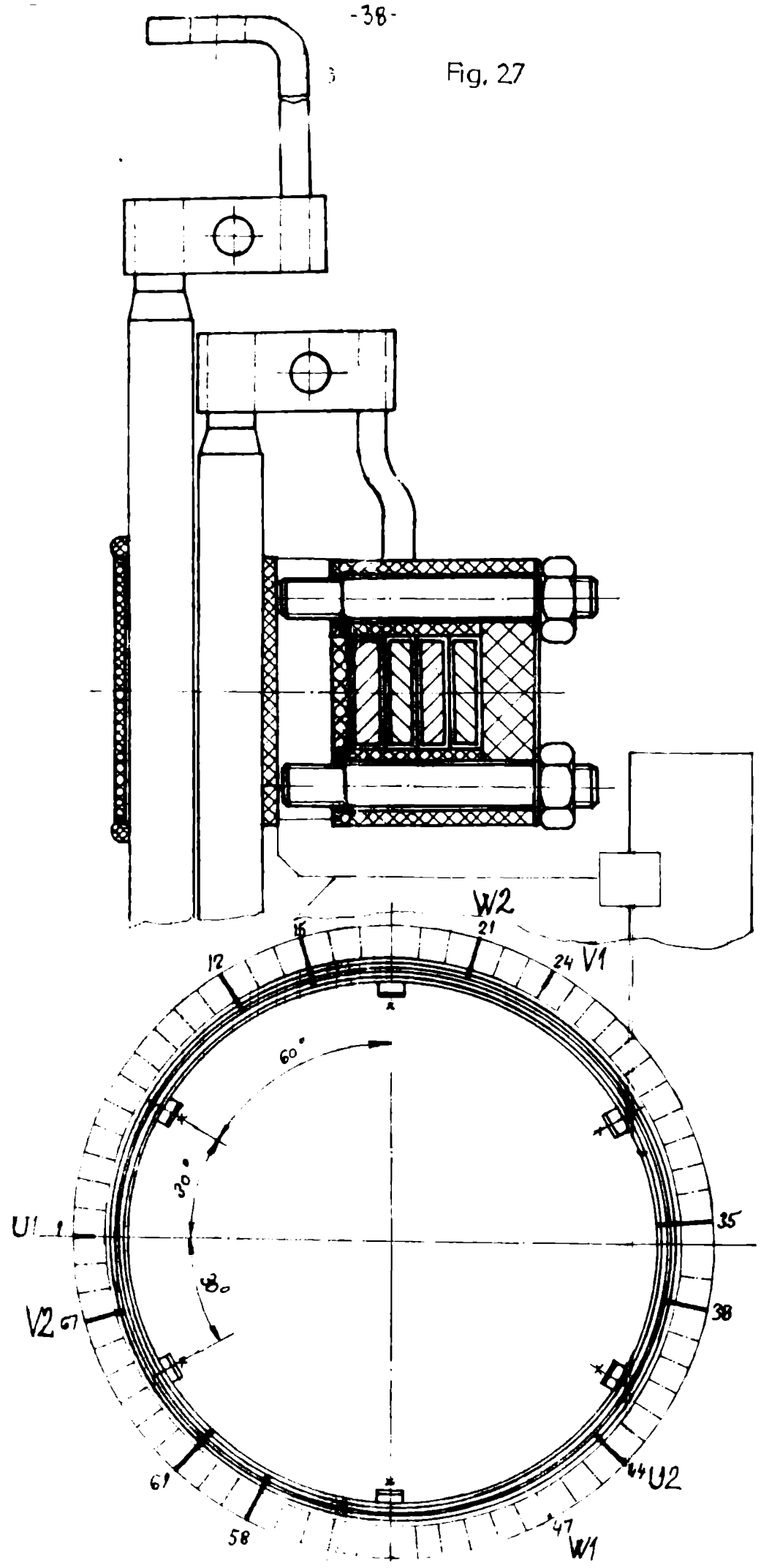
Prin plasarea conexiunilor sub partea frontală a bobinajului se micșorează lungimea excitatoarei, iar cele trei începuturi ale înfășurării rotorice se conectează direct prin intermediul unor bare de legătură, cu piesele de răcire care conțin diodele redresorului rotativ. (figura 2.1, 2.2)

Acest tip de înfășurare de indus ce se conectează la un redresor rotativ în punte trifazată cu dublă redresare, este utilizat de obicei cu o singură cale de curent în paralel ($a=1$), pentru a avea astfel cât mai puține puncte de secționare. Se folosesc la excitațiile de mai mică putere, dimensionate în așa fel, încât volumul de curent pe crestătură să nu depășească 1200 A, respectiv solenația specifică 500 A/cm (B 21).

B. Înfășurările în poligon cu un număr impar de faze destul de redus (7 sau 9) sînt înfășurări de tip ondulat cu pas diametral, laturile de bobine de întoarcere ale fiecărei faze constituie tot atîtea faze suplimentare simetrice, astfel încît reactanța de dispersie diferențială va corespunde de fapt unui număr dublu de faze, deci va fi considerabil redusă.

Pentru a reduce la minim conexiunile exterioare pe partea frontală a bobinajului rotorice se aleg înfășurări ondulate în două straturi al căror număr de crestături, faze, perechi de poli și căi de curent în paralel satisfac relațiile:

Fig. 27



$$\frac{Z}{m} = \text{întreg}$$

$$\frac{Z \pm a}{p} = \text{întreg} \quad (10)$$

Ca exemplu se prezintă în figura 2.8 o schemă de înfășurare cu $Z=63$ creștături, $m=7$ faze și $p=4$ perechi de poli. Elementele înfășurării determinate cu relațiile (10) sînt:

$$\frac{Z}{m} = \frac{63}{7} = 9 = \text{spire pe fază}; \quad y = \frac{Z+a}{p} = \frac{63+1}{4} = 16 \quad (8+8)$$

Se observă că acest bobinaj nu necesită nici o conexiune în afara celor normale pentru a trece de la o spiră la următoarea, iar conexiunile la diodele rotative se fac în mod regulat în puncte distanțate în spațiu la $2\pi/7$.

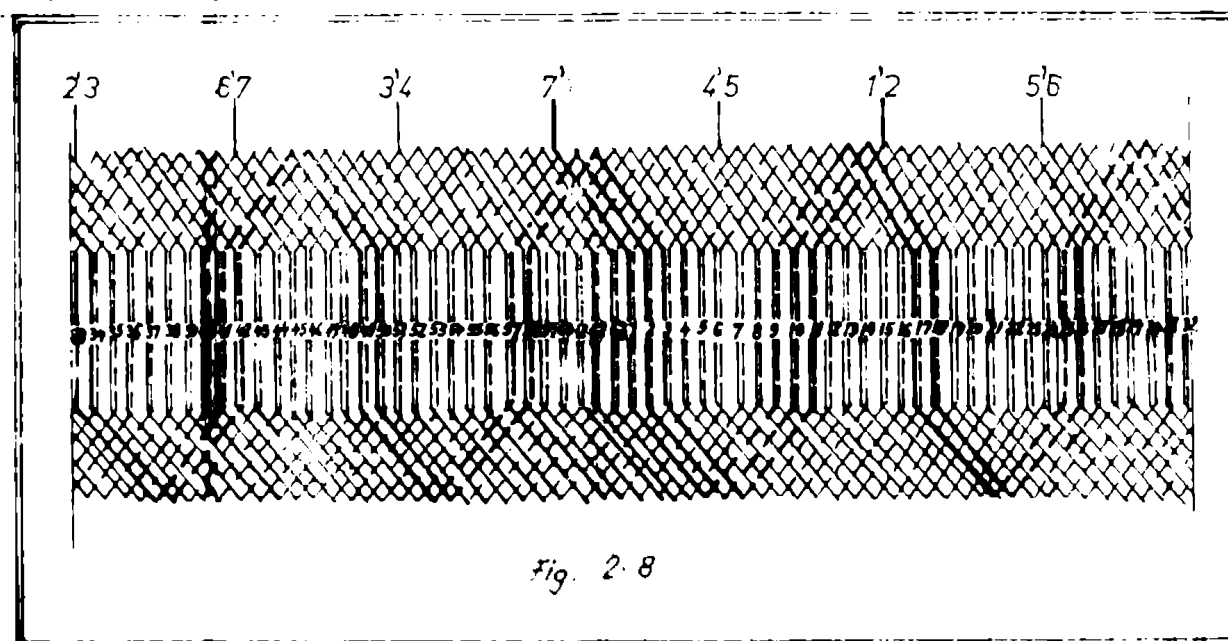


Fig. 2.8

Bornele notate cu 1, 1', 2, 2' ... 7, 7' din figura 2.8 reprezintă începutul și sfârșitul fiecărei faze care se conectează în poligon, așa cum se observă în figura 2.9.

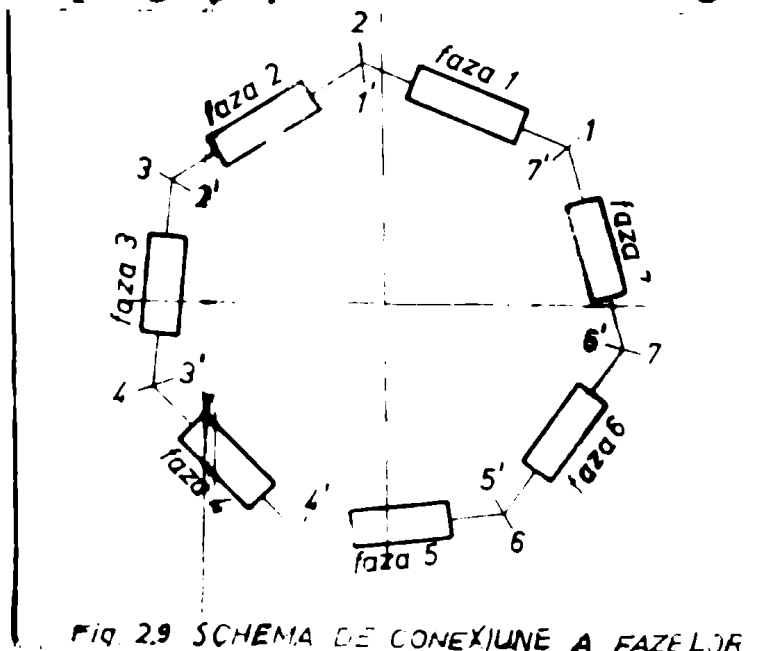


Fig. 2.9 SCHEMA DE CONEXIUNE A FAZELOR

Aceste puncte reprezentînd începutul și sfârșitul fazelor legate în poligon se conectează cu piesele de răcire ale redresorului rotativ cu ajutorul unor bare de legătură.

Această înfășurare reprezentată în figura 2.8 poate fi împărțită în 14 faze. În acest caz numărul de creștături este divizibil cu $m/2$ faze, obținându-se o înfășurare la care cele două extremități ale fiecărei faze sînt situate de o parte și cealaltă a rotorului, în așa fel încît legăturile la diodele rotative se fac pe fiecare parte a indusului. Această dispunere poate fi uneori avantajoasă cînd diodele necesită două discuri suport pentru fixare.

C. Înfășurările în poligon cu un număr mare de faze se folosesc la excitatoarele de putere mare și sînt înfășurări ondulate în două straturi, cu mai multe căi de curent în paralel, care se închid o singură dată, pentru a limita astfel curentul de circulație al armonicilor în poligon.

Înfășurarea în poligon cu un număr mare de faze prezintă avantajul că, în cazul defectării unei diode, sarcina acesteia este preluată fără perturbări de diodele fazelor vecine.

Pentru exemplificare se prezintă în figura 2.10 schema de bobinaj cu $Z=170$ creștături, $m=2$ căi de curent în paralel, $P=8$ perechi de poli, $n=17$ faze și corespunzător redresorului rotativ la care se conectează această înfășurare, în figurile 2.23, 2.24 și 2.25.

$$\text{Elementele înfășurării sînt: } \frac{Z}{m \cdot s} = \frac{170}{17 \cdot 2} = 5$$

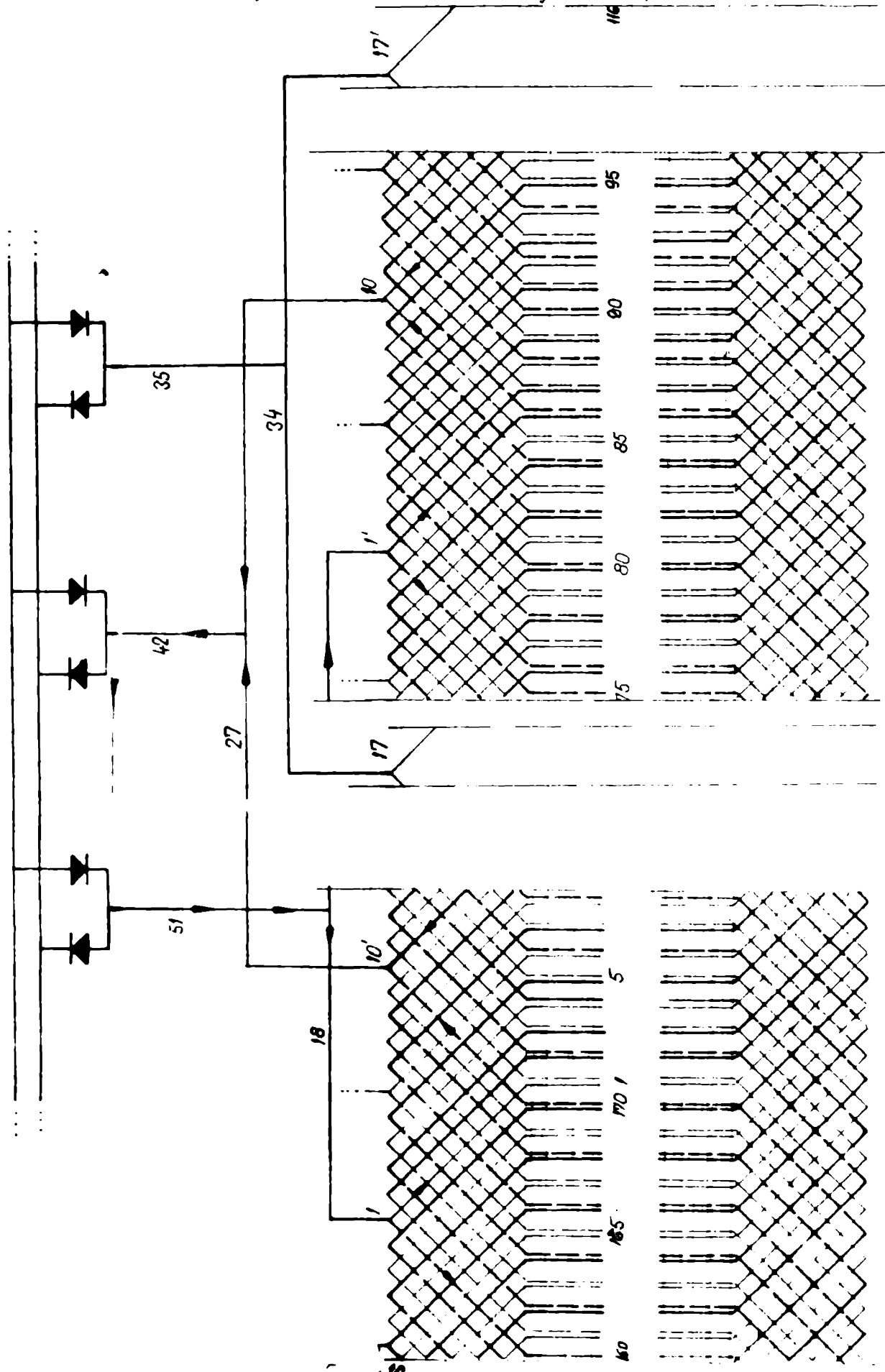
$$\text{spire pe fază; } y=y_1+y_2 = \frac{Z-s}{p} = \frac{170-2}{8} = 21(10+11)$$

Constructiv schema de bobinaj din figura 2.10 se realizează conectînd bobinele corespunzătoare celor două căi de curent în paralel repartizate la distanțe egale pe periferia indusului, la un număr de inele, egal cu numărul fazelor amplasate sub partea frontală a bobinajului, așa cum se observă în figurile 2.11 și 2.12. Din aceste figuri se observă că inelele de conexiune notate cu (18...34) sînt prevăzute și cu cîte o bază de legătură notată cu (35...51) spre piesele de răcire ce conțin diodele instalației de redresare rotativă polifazată.

În exemplul considerat curentul redresat al excitatoarei cu diode rotative se apropie de 2000 A și la această valoare prin alegerea a două căi de curent în paralel se poate micșora creștătura rotorică, care se dimensionează pentru curentul pe calea de curent, care în acest caz este jumătate din curentul pe fază al excitatoarei sincrone iar reacția indusului scade datorită înjumătățirii numărului de spire pe fază și implicit se micșorează și curentul de excitație al excitatoarei.

Adoptînd aceleași limite pentru volumul de curent pe

Schemă bobinaj indus excitatoare cu legături la puntea redresoare



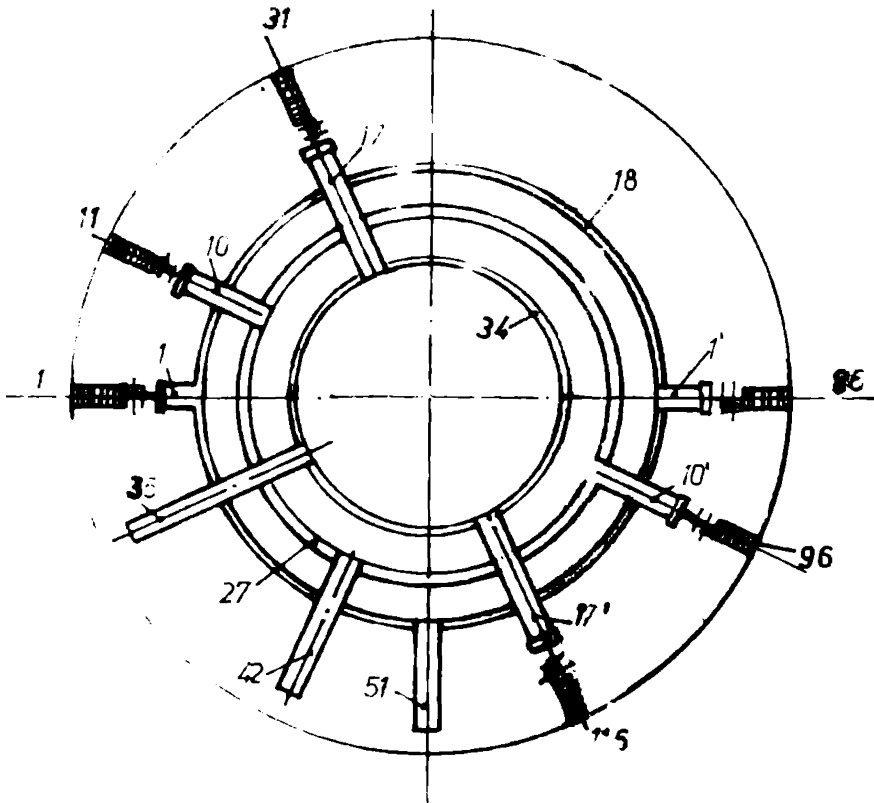


Fig. 2 11

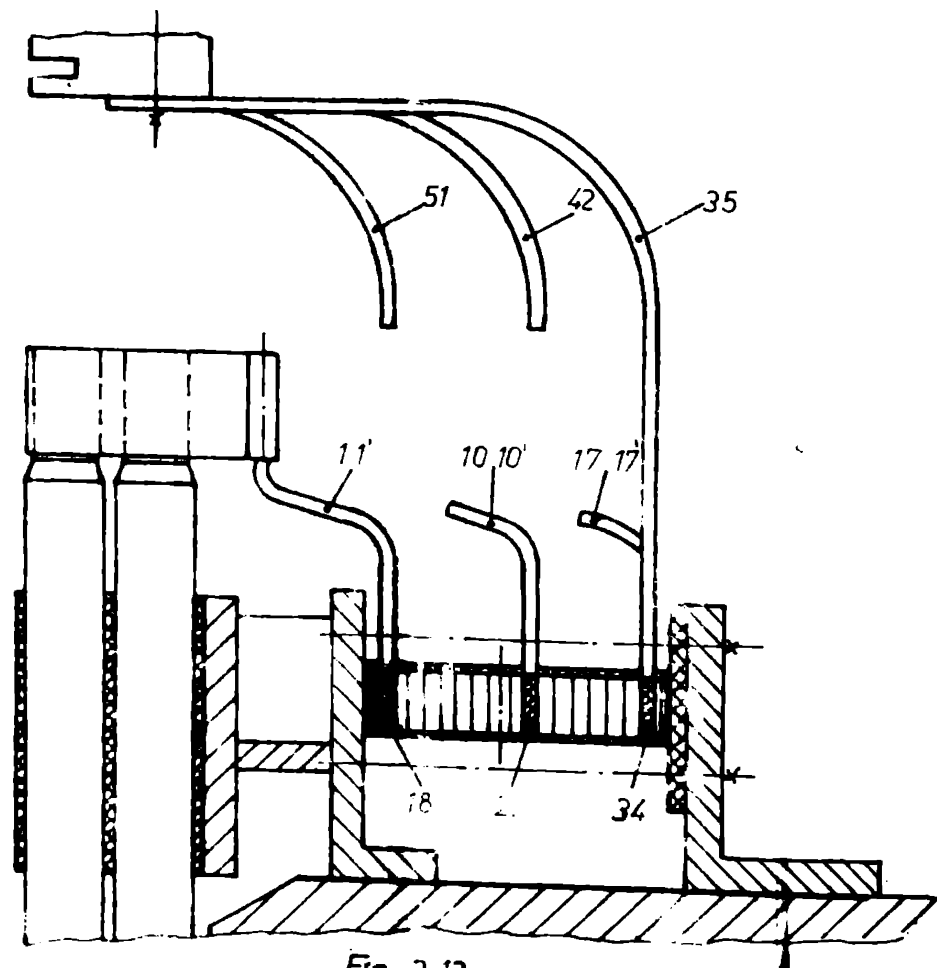


Fig. 2 12

crestătură și pentru solenștia specifică, ca și la înfășurările cu o casle de curent în paralel (B 21), se poate alege pasul crestăturii rotor de aproximativ 2 cm și corela astfel numărul de crestături rotorice, cu diametrul adoptat, cu numărul de poli și frecvența tensiunii electromotoare induse, într-un mod optim pentru mașinile sincrone de această putere (~ 500 kVA).

Înfășurările indusului excitatoarei sincrone cu diode rotative analizate permit, prin adoptarea potrivită a numărului de faze și a conexiunii acestora, micșorarea rezonanței de dispersie diferențială, care influențează direct procesul de comutație și deci buna funcționare a diodelor din redresorul rotativ. În acest fel, prin alegerea unuia din tipurile de înfășurări de indus prezentate se poate renunța la amplasarea unei înfășurări de amortizare, pe suprafețe polilor inductoarei și excitatoarei pentru reducerea armonicilor superioare (în special de ordinul 5 și 7), cărora le corespunde cimpul de dispersie diferențială. Acestea cu atât mai mult cu cât pe de o parte înfășurarea de amortizare este sursa unor pierderi, de loc neglijabile, iar pe de altă parte este un element defavorabil din punctul de vedere al funcției de reglare al excitatoarei, căreia i se cere o viteză de răspuns cât mai mare, iar înfășurarea de amortizare se opune totuși variațiilor rapide ale fluxului.

Înfășurările indusului (tipul A, B și C) precum și soluțiile constructive adoptate pentru realizarea și conectarea lor cu instalația de redresare rotativă se pot utiliza la o gamă foarte extinsă de puteri, tensiuni și turajii ale excitatoarelor sincrone cu diode rotative.

2.3. Redresarea polifazată în instalațiile de redresare rotative cu diode cu siliciu

În excitatoarea sincronă "m" fazată se induc tensiunile electromotoare u_{λ} ($\lambda=1, \dots, m$), care pentru a putea alimenta înfășurarea de excitație a generatorului sincron principal trebuie redresate.

Pentru puterile mari de excitație se folosesc scheme de redresare polifazate (m-fazate) bazate pe celule redresoare (obligat diode cu siliciu) care sînt avantajoase, deoarece tensiunea redresată obținută este mai netedă, chiar dacă nu se întrebunșează nici un filtru.

În gol curbe tensiunii redresate se prezintă ca o înfășurătoare superioară a "n" sinusoidale defazate cu $\frac{1}{n}$ perioade, care reprezintă respectiv tensiunile în gol a celor "n" faze. Această tensiune redresată în gol este suma unei anumite tensiuni continue U_e și a unui anumit număr de armonice.

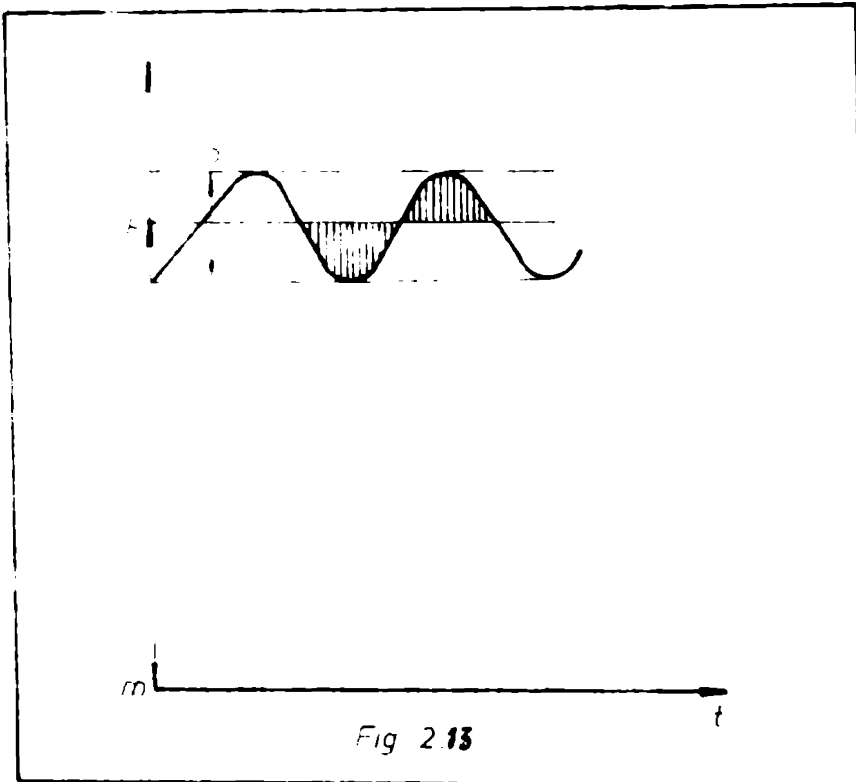


Fig. 2.13

Se definește prin "factor de ondulare", raportul dintre amplitudinea undulației și valoarea medie a tensiunii redresate. Se convine că amplitudinea ondulației este egală cu semi-diferența dintre ordonata maximă și cea minimă, a curbei înfășurătoare.

Referindu-ne la figura 2.13 se vede că valoarea factorului de ondulare va fi dat de raportul $K_o = \frac{1}{2} \frac{ab}{m_p}$ în care "ab" este dublul amplitudinii primei armonice, iar "mp" valoarea medie a tensiunii redresate.

Pentru evaluarea utilizării care se realizează cu perforanțele diodelor prin instalația de redresare se introduce noțiunea de "factor de utilizare", ce raport al puterii debitate de instalația de redresare și produsul dintre numărul diodelor, tensiunea inversă maximă a diodelor și curentul lor mediu:

$$f_u = \frac{U_{e\max} I_{sc}}{2 m U_{inv} I_{med}} \quad (11)$$

Alegerea schemei de redresare este prima și cea mai importantă etapă în conceperea instalației de redresare rotitoare, deoarece de aceasta depinde factorul de ondulare al tensiunii redresate, conținutul în armonici al curentului redresat, precum și factorul de utilizare al excitatoarei sincrone.

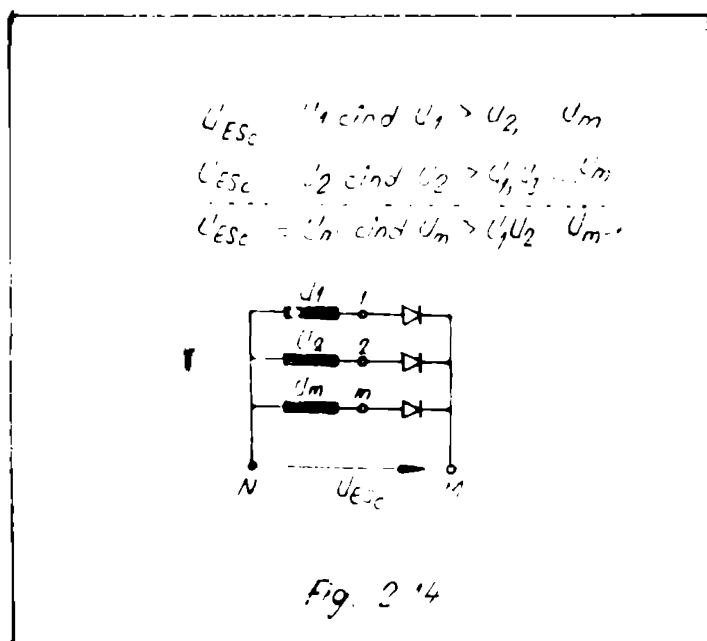
Tensiunile produse în indusul excitatoarei sînt alterne-

tive (evansinusoidele) și cu valcarea medie zero. Pentru obținerea unei tensiuni continue pornind de la aceste tensiuni induse, trebuie executată o comutare, adică trebuie schimbat în mod periodic, polaritatea bobinajului indusului excitatoarei pentru obținerea tensiunii unidirecționale dorite.

Sînt posibile în principiu două moduri de comutare și pentru a sublinia deosebirea dintre ele le vom denumi "comutație paralel" și "comutație serie".

2.3.1. Montajul de redresare cu "comutație paralel"

Montajul de redresare cu "comutație paralel" avînd schema principală din figura 2.14, constă în conectarea unor tensiuni alternative (U_1, U_2, \dots, U_m), în așa fel încît, în fiecare moment să se obțină la bornele N, M tensiunea continuă cu semnul dorit.



La comutație paralel din mai multe tensiuni alternative, se selectează tensiunea de ieșire cea mai mare. Pentru a putea compara tensiunile alternative, fazele în care se induc aceste tensiuni, sînt legate în stea, într-un punct comun "N" care formează una din bornele sursei de tensiune redresată. Cealaltă bornă "M" a acestei surse, este legată prin una din supape-

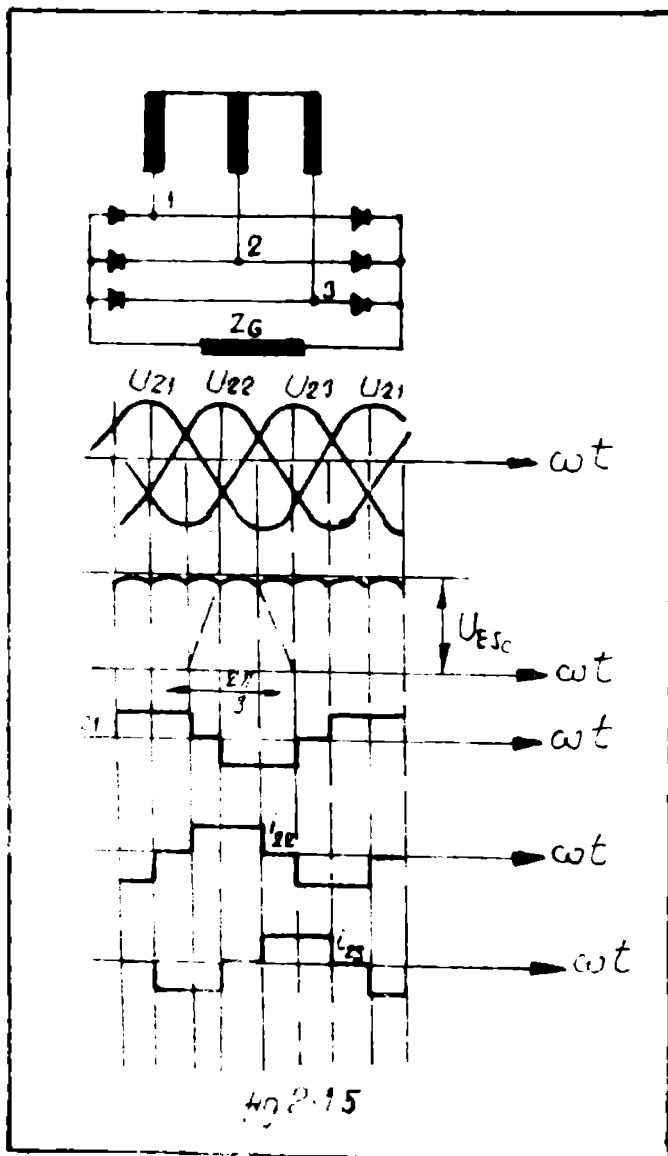
le redresare la bornele 1, 2, ..., m, care prezintă în momentul considerat potențialul cel mai ridicat în raport cu "N", diodele efectuînd deci o selectare a tensiunilor ce vor de valoarea tensiunii redresate.

În funcție de modul de conectare al diodelor cu punctul "M" se obține un redresor mai pozitiv (dacă astozii unese punctul M cu bornele 1, 2, 3) respectiv "mai negativ" (dacă astozii diodelor se leagă la punctul M), în fiecare moment tensiunea " U_{ESc} " redresată fiind egală cu cea mai pozitivă, respectiv cea mai negativă, dintre valorile tensiunilor U_1, U_2, \dots, U_m .

(variantă a modului de "comutație paralel" îl consti-

tule "comutație paralelă dublă". Acest tip de montaj redresor utilizează $2m$ diode pentru redresarea a m tensiuni alternative. Un prim grup de m diode reunite, formează borne de o polaritate și celălalt grup de m diode, borne de cealaltă polaritate a sursei de tensiune redresată.

Acest montaj foarte utilizat în monofazat poartă numele de punte "Graetz". Fiecare grup de două diode efectuează o comparație, selectând cea mai pozitivă sau cea mai negativă dintre cele două semisinusoide. Această denumire de punte "Graetz" se dă și schemei de redresare trifazată utilizând 6 diode. În cazul în care cele trei faze ce alimentează puntea sînt legate în stea, așa cum se observă în figura 2.15, se produce o comutare asemănătoare modului paralel, dar cu două selecții în loc de una. De aceea se va utiliza în acest caz denumirea de "comutație paralelă dublă" (sau punte trifazată cu dublă redresare pentru situația $m=3$) și



nu cea de montaj în punte "Graetz", pentru a desemna redresarea ce utilizează $2m$ diode pentru redresarea a m tensiuni furnizate de m faze conectate în stea. Pentru cazul general al redresării prin "comutație paralelă" și "comutație paralelă dublă" a m tensiuni alternative se prezintă schemele din figurile 2.16, 2.17, în baza cărora se stabilesc relațiile pentru tensiune, curent, factorul de utilizare și factorul de ondulație al tensiunii redresate. Admițînd ipotezele simplifi-

astoriai să; tensiunile din indusul excitatoarei formează un

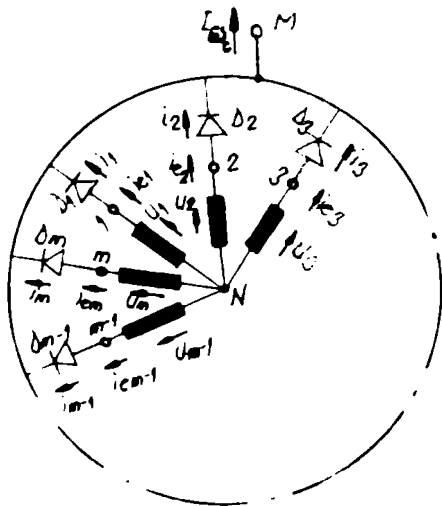


fig 2-16

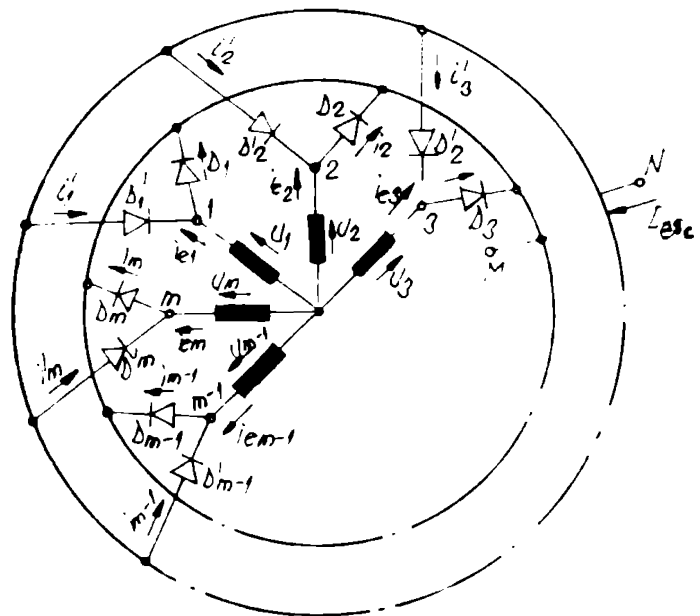


fig 2-17

sistem simetric și se realizează o comutație instantanee a curentului între două faze care conduc în mod succesiv, atunci pentru o excitatoare cu "m" faze, durata de conducție este de $\frac{2\pi}{m}$ radiani în fiecare perioadă și fiecare supapă redresează, iar tensiunea redresată este dată de înfășurătoarea pozitivă a tensiunilor de fază, ale indusului excitatoarei. Considerând tensiunile induse în excitatoare de formă generală: $U_{ES} = U_{ESm} \sin[\omega t - (m-1)\frac{2\pi}{m}]$, pentru valoarea medie a tensiunii redresate rezultă o funcție pară conținând numai componente în cosinus și a cărei expresie devine: (B 58)

$$U_{ESC} = 2 \frac{m}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{m}} U_{ESm} \cos \omega t d(\omega t) = \frac{2m}{\pi} U_{ESm} \sin \frac{\pi}{m} \quad (12)$$

iar pentru "comutație paralelă dublă" valoarea medie a tensiunii redresată devine:

$$U_{ESC} = \frac{2m}{\pi} U_{ESm} \sin \frac{\pi}{m} \quad (13)$$

unde: - m - numărul de faze al excitatoarei

$$U_{ESm} = \sqrt{2} U_{ES}$$

U_{ES} - valoarea efectivă a tensiunii în indusul excitatoarei.

Valorile medii ale curenților redresați pentru schemele de conexiune cu "comutație paralelă" și "comutație paralelă-dublă" sînt (B 65).

$$I_{ESC} = \sqrt{m} I_{ES} \quad (14)$$

$$I_{ESc} = \sqrt{\frac{m}{2}} I_{ES} \quad (15)$$

unde: I_{ES} - valoarea efectivă a curentului în faze indusul excitatoarei.

Dezavantajele modului de redresare cu "comutație paralel" și "paralel-dublu" se referă în special la creșterea unghiului de comutație, odată cu măririle numărului de faze, în timp ce coeficienții de utilizare se micșorează, motiv pentru care acest montaj de redresare se limitează la conexiunea trifazată cu dublă redresare cu care se obțin cei mai buni coeficienți de utilizare. De aceea, excitatoarele sincrone având înfășurarea indusului trifazată în stea (tipul A, § 2.2), se conectează la un montaj de redresare cu comutație "paralel-dublă" așa cum se arată în figura 2.15, iar valorile medii ale tensiunii și curentului redresat obțin în acest caz expresiile:

$$I_{ESc} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ES} \quad (16)$$

$$U_{ESc} = 2,34 U_{ES} \quad (17)$$

2.3.2. Montajul de redresare cu "comutație serie"

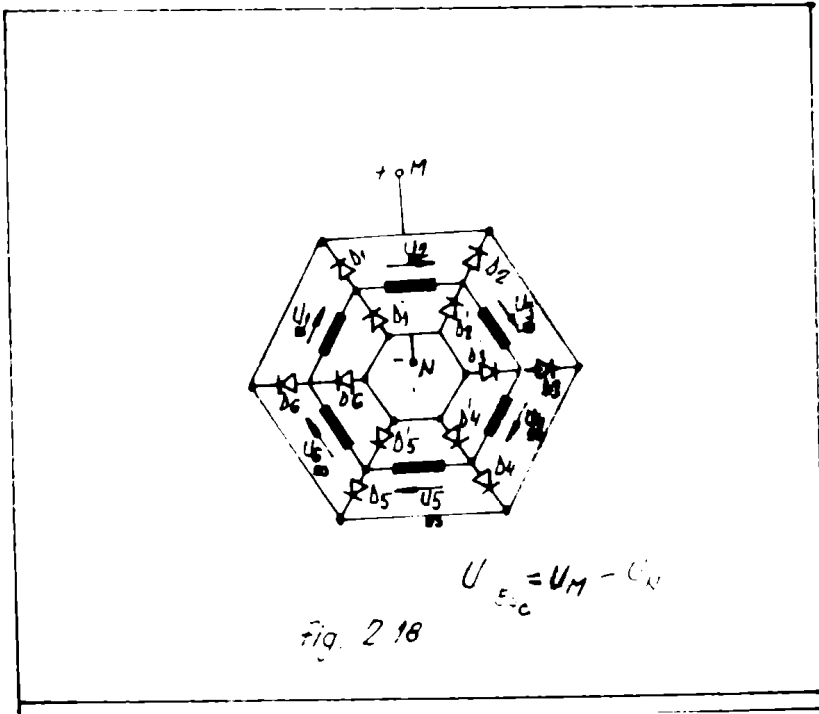
Montajul de redresare cu comutație serie, mai puțin comun decât cel cu comutație paralel, este de preferat, ori de câte ori numărul de faze al indusului excitatoarei "m" este mai mare decât 3 (înfășurările de tip B și C din §2.2), așa cum va rezulta din analiza ce urmează, motiv pentru care această problemă este dezvoltată mai mult decât cazul usual al punții trifazate cu dublă redresare.

La redresarea prin "comutație serie", fazele în care se induc tensiunile alternative sînt legate în serie, ceea ce presupune că suma lor momentană este nulă, iar redresarea constă în sumarea în fiecare moment a tensiunilor alternative de același semn, pentru obținerea tensiunii redresate, așa cum se observă în figura 2.18.

Vîrfurile poligonului (figura 2.18) astfel format, al cărui potențial relativ este cel mai ridicat la un moment dat, se leagă la borna pozitivă a instalației de redresare, iar cel al cărui potențial este cel mai slab pozitiv la borna de coalație polaritate. Acesta este, în principiu, modul de redresare realizat de colectorul generatoarelor de curent continuu. Sumarea efectuată într-un generator de curent continuu prin colectorul său, se poate realiza și printr-o instalație de redresare compusă dintr-un ansamblu de supape redresoare. Cele "m" faze rotorice ale excitatoarei în care se induc "m" tensiuni alternative

ale căror sumă este zero sînt grupate într-un poligon. În fiecare vîrf al poligonului sînt legați anechii unei serii de diode D_1, D_2, \dots, D_m , și a căror catodii uniți formează borna de o polaritate a tensiunii redresate, de asemenea în fiecare vîrf al poligonului sînt conectați catodii unei a doua serii de diode D'_1, D'_2, \dots, D'_m , și ei a căror anechi legați împreună formează borna de cealaltă polaritate (figura 2.19).

În figura 2.18 se prezintă schema unui montaj în poligon cu redresare serie pentru $n=6$. Dacă de exemplu $u_{ES1}, u_{ES2}, u_{ES3}$ sînt pozitivi atunci tensiunea redresată: $u_{ES0} = u_{ES1} + u_{ES2} + u_{ES3} = -(u_{ES4} + u_{ES5} + u_{ES6})$ iar pentru $u_{ES2}, u_{ES3}, u_{ES4}$ pozitivi: $u_{ES0} = u_{ES2} + u_{ES3} + u_{ES4} = -(u_{ES5} + u_{ES6} + u_{ES1})$.



Redresarea prin comutație serie a fost pînă nu de mult relativ puțin utilizată, datorită unor inconveniente ce se observă chiar din schema de montaj din figura 2.18 și anume: necesitatea unui număr dublu de diode față de "comutația paralel" implicit și căderea de ten-

sione ce apare în două diode. Diodele cu siliciu a căror utilizare tinde să se generalizeze, micșorează inconvenientul căderii de tensiune în redresor, dar în schimb suportînd o tensiune inversă maximă destul de redusă, necesită frecvent conectarea mai multor diode în serie. Deci se observă că montajul redresor cu "comutație serie" reduce tensiunea inversă ce se aplică diodelor, iar inconvenientul căderii de tensiune este minim.

Vom analiza modul de obținere a tensiunii continue pornind de la sistemul de tensiuni alternative induse în excitatoarea polifază și vom compara apoi cele două noduri de redresare. Presupunem că impedanțele fazelor excitatoarei sînt neglijsbile, deci nu există nici o suprapunere a tensiunilor care sînt sinusoidale și constante oricare ar fi sarcina excitatoarei.

Căderea de tensiune internă în diodele care conduc va fi neglijsată și reactanța pe care debitează tensiunea redresată o presupunem infinită. În această ipoteză, determinăm în primul rînd tensiunea redresată. Înseamnă cu $U_{ES1}, U_{ES2} \dots U_{ESm}$ cele m tensiuni sinusoidale corespunzătoare celor m faze din indusul excitatoarei conectate în poligon vom avea la un moment dat: (fig. 2.19)

$$\begin{aligned} U_{ES1} &= U_{ESmax} \sin \omega t \\ U_{ES2} &= U_{ESmax} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{m} \right) \\ \dots & \\ U_{ESm} &= U_{ESmax} \sin \left[\omega t - (m-1) \frac{2\pi}{m} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

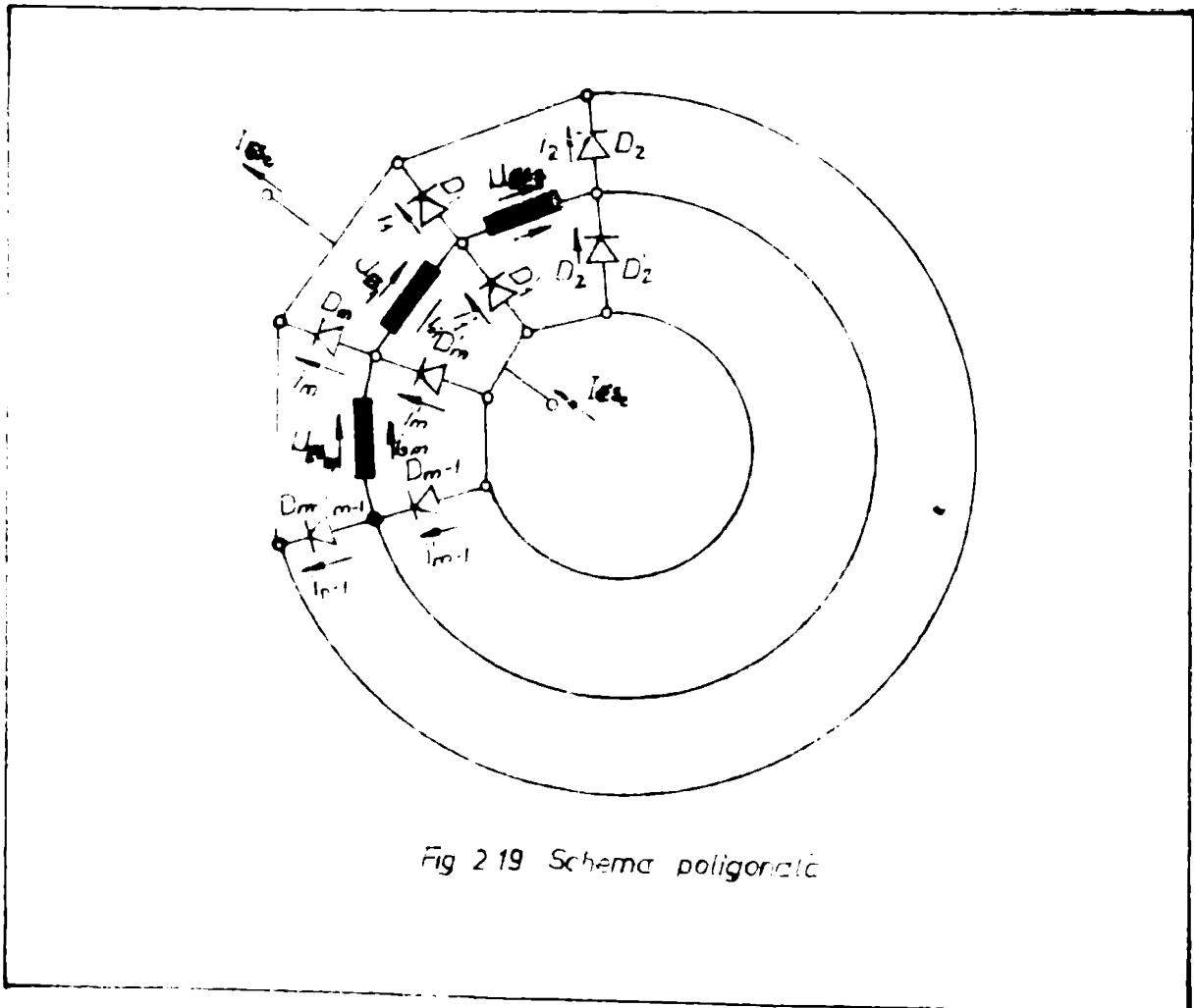


Fig 2.19 Schema poligonică

Borne "H" este legată, prin intermediul catodilor diodelor ($D_1 \dots D_m$) corespunzătoare, la virful poligonului al cărui potențial este cel mai ridicat. Acest virf este capătul înfășurării cu tensiune pozitivă, în momentul ales, tensiunile fiind considerate în ordinea directă a succesiunii fazelor. De asemenea, borne "H" este legată prin anodii diodelor ($D'_1 \dots D'_m$) la virful poligonului al cărui potențial este cel mai scăzut; acest virf corespunzând înfășurării fazei cu tensiune negativă.

Tensiunea redresată instantanee " U_{ES} " este diferența de potențial între sfârșitul ultimei faze și începutul primei faze a căror tensiuni sînt egale cu suma tensiunilor pozitive ale sistemului polifazat.

Examinînd separat celul în care numărul de faze "m" este par și cel în care numărul de faze "m" este impar (B 58) se obține pentru ambele cazuri valoarea medie a tensiunii redresate:

$$U_{ESc} = \frac{m}{\pi} U_{ES} \quad (19)$$

În considerațiile făcute s-a scris ipoteza unei treceri instantanee a stării de conducție de la o celulă redresare la alta. Într-un circuit real, curentul într-o celulă redresare care începe să conducă trebuie să crească concomitent cu scăderea curentului din celula vecină care se blochează, astfel încît în orice moment suma acestor doi curenți să fie egală cu curentul de sarcină. În acest mod există o perioadă de suprapunere sau de comutație între perioadele de conducție a două celule redresare vecine, carei îi corespunde unghiul de comutație " α ". Ținînd cont de unghiul de comutație " α " al diodelor, valoarea medie a tensiunii redresate se exprimă (B 57)

$$U_{ESc} = U_{ESc} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \quad (20)$$

Acestă relație (19) este valabilă oricare ar fi modul de cuplare al fazelor și oricare ar fi numărul de diode care debitează simultan, cît timp unghiul de comutație al zonelor de funcționare al diodelor " α " rămîne mai mic decît $[\pi - \frac{2\pi}{m}]$

2.3.2.1. Ten tensiune inversă și factorul de ondulație al redresorului

Valoarea relativă a ondulațiilor pentru o excitatoare cu un număr par de faze este dată de relație (B 58):

$$K_0 = \frac{U_{ESCmax} - U_{ESCmin}}{2 U_{ESC}} = \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{1 - \cos \frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} \quad (21)$$

Deși numărul de faze al excitatoarei este impar, valoarea relativă a ondulației este:

$$K_0 = \frac{U_{ESCmax} - U_{ESCmin}}{2 U_{ESC}} = \frac{\pi}{4m} \cdot \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2m}}{\sin \frac{\pi}{2m}} \quad (22)$$

În relațiile (21) (22) prin U_{ES} se înțelege tensiunea maximă redresată la mijlocul intervalului $(\frac{T}{2} - \frac{T}{m}; \frac{T}{2})$, iar U_{ESmin} este valoarea minimă la extremitățile acestui interval.

Tensiunea inversă maximă este egală cu valoarea maximă a tensiunii redresate (figura 2.2).

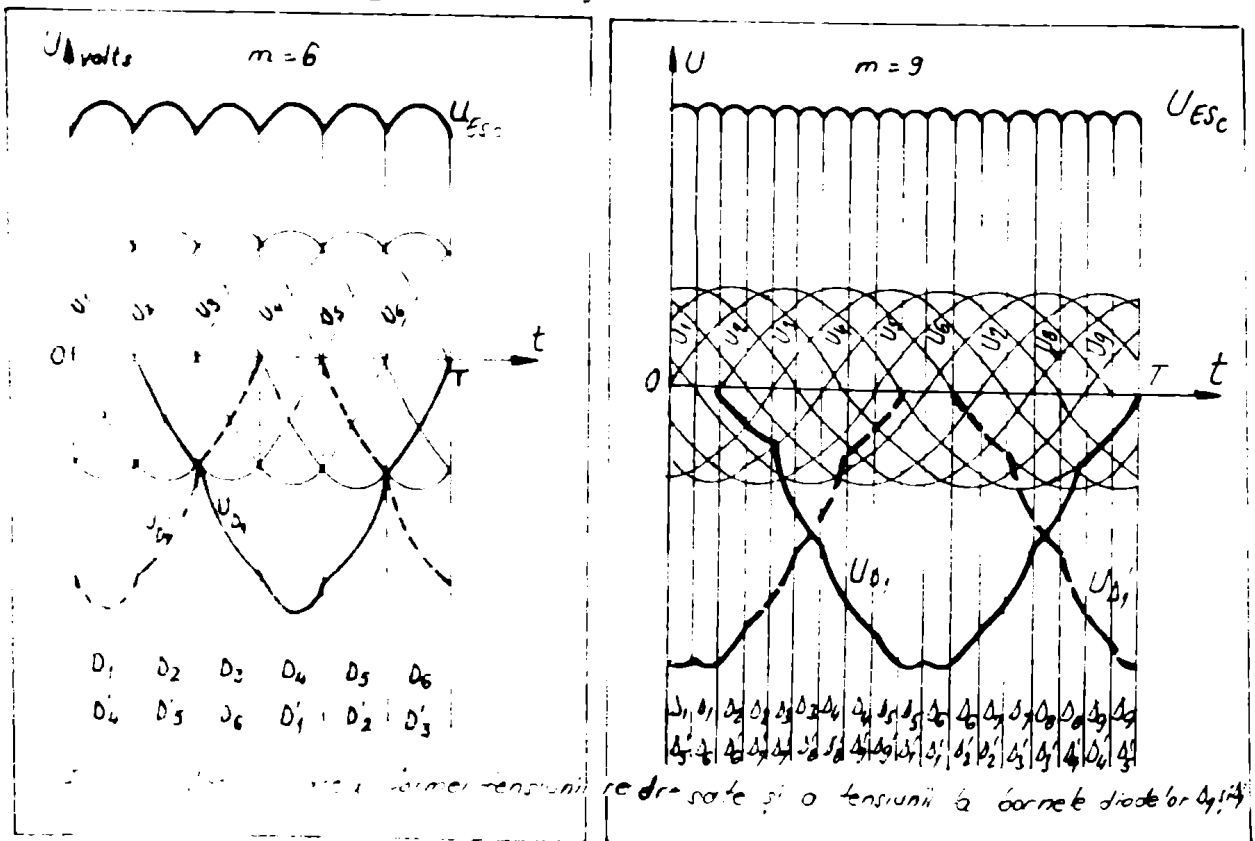
Deși "m" este un număr par (B 5a):

$$U_{inv,max} = \frac{U_{ESm}}{\sin \frac{\pi}{m}} \quad (23)$$

Iar dacă "m" este impar:

$$U_{inv,max} = \frac{U_{ESm}}{2 \sin \frac{\pi}{2m}} \quad (24)$$

Figure 2.2 prezintă pentru $m=6$ și $m=9$, modul de determinare a formei tensiunii redresate " U_{ES} " și a tensiunii la bornele diodelor D_1 și D_2 , pornind de la tensiunile din induusul excitatoarei u_1, u_2, \dots, u_m . În timpul fiecărui interval sînt indicate cele două diode care asigură conducția.



2.3.2.2. Curentul direct și factorul de utilizare al redresorului

Decă notăm cu I_{ESc} curentul continuu, presupus fără ondulații reziduale, pe care îl furnizează instalația de redresare, fiecare diodă asigură trecerea curentului I_{ESc} un timp egal cu T/m . Deci, pentru fiecare din cele "2 m" diode curentul maxim și mediu este:

$$I_{max} = I_{ESc} \quad (25)$$

$$I_{med} = \frac{I_{ESc}}{m} \quad (26)$$

Decă "m" este par, avind în vedere relațiile (23) și (26), factorul de utilizare devine:

$$f_u = \frac{m}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (27)$$

iar pentru "m" impar avind în vedere relațiile (24) și (26):

$$f_u = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m} \quad (28)$$

Curentul dintr-o fază a infășurării indusului pentru cazul cînd numărul de faze este par va avea valoarea efectivă (B 58):

$$I_{ESf} = \frac{I_{ESc}}{2} \quad (29)$$

iar pentru numărul de faze "m" impar va avea valoarea efectivă (B58):

$$I_{ESf} = \frac{I_{ESc}}{2} \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \quad (30)$$

2.3.2.3. Căderea de tensiune datorită comutației

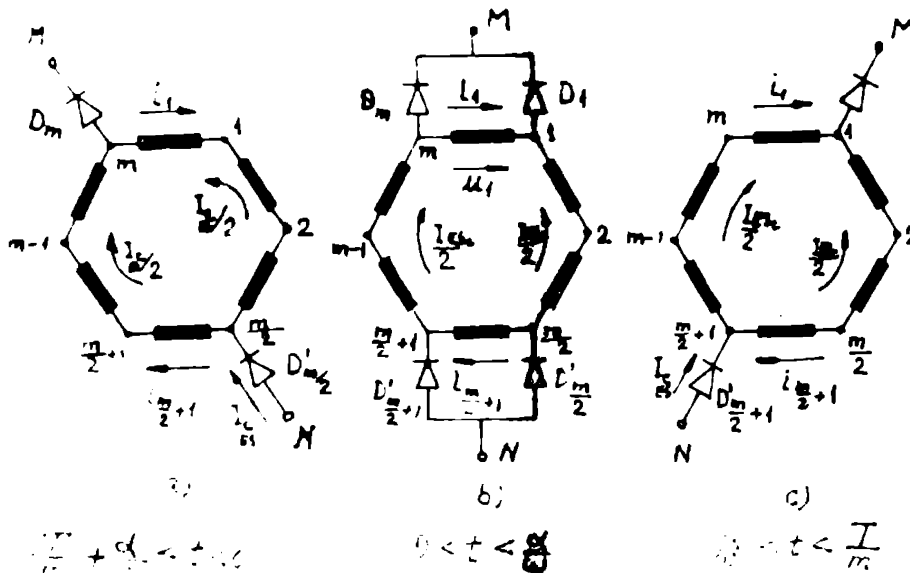
Din cauza rezistenței de dispersie a infășurării indusului excitatoarei, curentul din infășurare nu se poate inversa instantaneu, în momentul în care t.e.m. indusă schimbă semnul. Această inversare necesită un anumit interval de timp, în care faza "în comutație" este pusă în scurtcircuit de cele două diode conectate la cele două extremități ale sale.

Pentru a studia fenomenul și căderea de tensiune redresată pe care o determină, se va ține cont de ansamblul de rezonanțe dator printr-o rezonanță unică " x_c " - rezonanțe de comutație identică pentru fiecare fază. Se va neglija efectul rezistenței infășurărilor, de asemenea ne limităm la cazul cînd curentul continuu " I_{ESc} " este dat de un număr de diode ce nu depășește

doar diode în serie ce conduc simultan. Considerăm separat cele două cazuri:

- cazul cu numărul de faze "m" par:
- dacă înaintea momentului $t=0$, tensiunea din indu-
sul excitatoarei " u_{ESm} " este pozitivă, atunci u_{ES1}
este negativă (figura 2.21).

Fig. 2.21



Poligonul înfășurărilor este legat la borne "N" prin diode D_m ; curentul i_{ES1} în prima fază este $\frac{I_{ESc}}{2}$

În momentul $t=0$, tensiunea u_{ES1} devine pozitivă, dioda D_1 va fi blocată, înfășurarea fazei 1 este scurtcircuitată de conducția simultană a diodelor D_m și D_1 .

Acest scurtcircuit durează în intervalul cuprins între momentele $t=0$, când $i_{ES1} = -\frac{I_{ESc}}{2}$ și $t = \frac{\alpha}{\omega}$ când $i_{ES1} = +\frac{I_{ESc}}{2}$, unde " " reprezintă unghiul de comutație.

În intervalul $(0 - \frac{\alpha}{\omega})$ curentul i_{ES1} nu poate prezenta discontinuități, iar în momentul $t = \frac{\alpha}{\omega}$ corespunzând sfârșitului comutației, acesta stinge valoarea $+\frac{I_{ESc}}{2}$. Unghiul de comutație " " se poate determina din această condiție cu expresia (B 58):

$$1 - \cos \alpha = \frac{\alpha I_{ESc}}{U_{ESm}} \quad (31)$$

În timpul punerii în scurtcircuit a fazei 1 a infășurării, suma tensiunilor pozitive este dictată față de tensiunea U_{ES1} , rezultând o micșorare ΔU_c a tensiunii redresate medii.

$$\Delta U_c = \frac{m}{T} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} U_{ESm} \sin \omega t dt = \frac{m}{\omega T} U_{ESm} (1 - \cos \alpha) = \frac{m}{2\pi \omega C} x_c I_{ESc}$$

Valoarea relativă a căderii de tensiune datorită ocupației va fi:

$$\frac{\Delta U_c}{U_{ESc}} = \frac{x_c I_{ESc}}{2 U_{ESm}} \quad (32)$$

și este independentă în acest caz de numărul de faze.

În timpul intervalului $(0, \frac{\pi}{\omega})$ necesar pentru inversarea curentului în faza 1, trecerea de la valoarea $-\frac{I_{ESc}}{2}$ la valoarea $+\frac{I_{ESc}}{2}$ a curentului în faza $(\frac{1}{2} + 1)$, necesită punerea sa, în scurtcircuit de curentul simultan al supapei redresoare $\frac{1}{2}$ și $\frac{1}{2} + 1$.

Aștit în timpul conducției a patru diode sit și în timpul conducției a două diode, cele două circuite care unesc bornele N și M totalizează aceeași tensiune și aceeași număr de faze; curentul în fazele care nu sînt scurtcircuitate rămîne întotdeauna $\frac{I_{ESc}}{2}$.

Cazul cu numărul de faze "a" impar:

Studiul tensiunii redresate și al curentului din inductorul excitatorului în cazul unui număr de faze "a" impar, efectuat neglijînd rezistențele a dus la următoarele rezultate (figura 2.22):

a) Schimbarea diodelor legate la unul din virfurile poligonului cu borne N, nu se face în același timp cu schimbarea diodei legate la celălalt virf, la borne M.

b) Curenții în cele două circuite unind punctele N și M sînt diferiți. Circuitul conținînd $\frac{a+1}{2}$ faze ale inductorului este parcurs de curentul $\frac{I_{ESc}}{2}(1 - \frac{1}{a})$ în timp ce, celelalte $\frac{a-1}{2}$ faze, sînt parcurse de $\frac{I_{ESc}}{2}(1 + \frac{1}{a})$.

În particular, în momentul inversării sale, într-o fază curentul trece de la $\frac{I_{ESc}}{2}(1 - \frac{1}{a})$ la $-\frac{I_{ESc}}{2}(1 - \frac{1}{a})$ sau invers.

În figura 2.22 se arată etapele inversării curentului în faza numărul 1 și începutul inversării în faze de ordinul $\frac{a+1}{2}$, iar căderea de tensiune relativă devine:

$$\frac{\Delta U}{U_{ESc}} = \frac{x_c I_{ESc}}{2 U_{ESm}} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \quad (33)$$

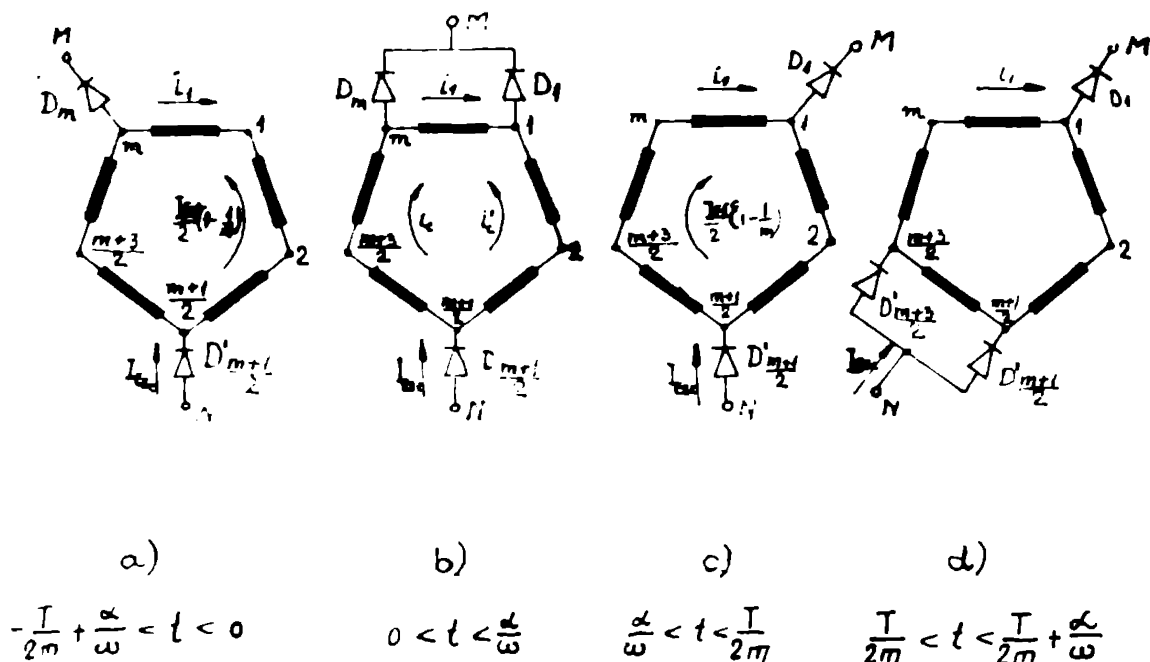


Fig. 2.22

Din analiza efectuată se observă că unghiul de comutație "α" este independent de numărul de faze, în cazul redresării prin comutație serie, iar valoarea relativă a căderii de tensiune este mai mică în cazul în care numărul de faze conectate în poligon este impar, decât în cazul în care numărul de faze este par. În ce privește factorul de ondulare acesta este mai mic în cazul în care numărul de faze al excitatoarei conectate în poligon este impar, iar factorul de utilizare este ceva mai mare decât în cazul fiind numărul de faze este par.

2.3.2.4. Compararea modalităților de redresare

Din analiza modalităților de redresare reiese că există două procedee care permit redresarea unui ansamblu de tensiuni alternative și anume: comutație paralelă cu variante comutație paralelă dublă, care este procedeul constând în compararea tensiunilor, pentru a reține doar tensiunea cea mai mare de semn convenabil și comutație serie, care este modul mai puțin usual, prin care se efectuează sumarea tensiunilor ce prezintă semnul convenabil.

Tabel 1

Tip conector	Nr. de faze	Nr. de diode	Tensiune reversată - valoare medie	Tensiune inversă maximă	Curentul direct mediu și maxim	Valoarea efectivă a curentului în inductiv excitației	Factorul de ondulată	Factorul de utilizare a inst. de redresare	Coeficient de tensiune inductivă
paralel	par	m	$U_{Ec} = \frac{m}{\pi} U_{\phi} \sin \frac{\pi}{m}$	$U_{\text{inversă max}} = 2U_{\phi}$	$i_{\text{med}} = \frac{I_{Ec}}{m}$ $i_{\text{max}} = I_{Ec}$	$I_{Ec} = \frac{I_{Ec}}{\sqrt{m}}$	$K_{\phi} = \frac{\pi}{2m} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}}$	$f_u = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}$	$\frac{\Delta U_c}{U_{Ec}} = \frac{X_c I_{Ec}}{2U_m \sin \frac{\pi}{m}}$
	impar			$U_{\text{inversă max}} = 2U_{\phi} \cos \frac{\pi}{2m}$				$f_u = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m}$	
paralel dublu	par	2m	$U_{Ec} = \frac{2m}{\pi} U_{\phi} \sin \frac{\pi}{2m}$	$U_{\text{inversă max}} = 2U_{\phi} \cos \frac{\pi}{2m}$	$i_{\text{med}} = \frac{I_{Ec}}{m}$ $i_{\text{max}} = I_{Ec}$	$I_{Ec} = I_{Ec} \sqrt{\frac{2}{m}}$	$K_{\phi} = \frac{\pi}{4m} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2m}}{\sin \frac{\pi}{2m}}$	$f_u = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m}$	$\frac{\Delta U_c}{U_{Ec}} = \frac{X_c I_{Ec}}{2U_m \sin \frac{\pi}{2m}}$
	impar								
serie	par	2m	$U_{Ec} = \frac{m}{\pi} U_{\phi}$	$U_{\text{inversă max}} = \frac{U_m}{\sin \frac{\pi}{2m}}$	$i_{\text{med}} = \frac{I_{Ec}}{m}$ $i_{\text{max}} = I_{Ec}$	$I_{Ec} = \frac{I_{Ec}}{2}$	$K_{\phi} = \frac{\pi}{2m} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2m}}{\sin \frac{\pi}{2m}}$	$f_u = \frac{m}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m}$	$\frac{\Delta U_c}{U_{Ec}} = \frac{X_c I_{Ec}}{2U_m}$
	impar			$U_{\text{inversă max}} = \frac{U_m}{2 \sin \frac{\pi}{2m}}$				$f_u = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m}$	$\frac{\Delta U_c}{U_{Ec}} = \frac{X_c I_{Ec} (1 - \frac{1}{m})}{2U_m}$
serie paralel paralel dublu			$U_{Ec} = U_{\phi} \cos \frac{\phi}{2}$						

Însumând relațiile generale sintetizate în tabelul 1 referitoare la cele 3 tipuri de montaje redresare cu comutație

paralel, paralel dublu și serie se observă următoarele:

- a) Montajele cu comutație paralel dublu și serie necesită de două ori mai multe diode decât montajul cu comutație paralel. Acest neajuns este redus prin faptul că puterea aparentă a ansamblului diodelor este aceeași pentru cele trei variante de montaje.
- b) Factorul de ondulare " γ_u " și tensiunii redresate este identic în cele trei cazuri dacă numărul de faze " m " este par. Dacă " m " este impar cu montajul cu comutație paralel dublu și serie se obține un factor de ondulare mai scăzut decât cel dat de montajul cu comutație paralel.
- c) Scăderea factorului de utilizare " ξ_u " și creșterea căderii de tensiune în sarcină cu creșterea numărului de faze " m " este principala neajuns a comutației paralel față de comutație paralel dublu și serie.
- d) Multiplicarea cu doi a numărului diodelor în cazul montajelor cu comutație paralel dublu și serie se justifică dacă numărul de faze este impar, pentru că în acest caz se obține o reducere a factorului de ondulare.
- e) Când numărul de faze este mai mare decât trei comutație serie se dovedește preferabilă comutației paralel dublu, deoarece se obține un factor de utilizare mai ridicat și căderea de tensiune datorită comutației mai redusă.

Din aceste considerații, pentru excitatoarele sincrone de mare putere avînd în special un curent redresat mare (peste 1500 A), la o tensiune de excitație usuală (în jur de 250 Vcc), cu optet pentru excitatoare cu un număr impar de faze de cel puțin de mare (superior lui 11), conectate în poligon cu montaj de redresare cu comutație serie.

2.3.2.5. Soluția constructivă a instalației de redresare rotativă cu comutație serie

Excitatoarele sincrone de mare putere, realizate la aproximativ 200 kVA, avînd un curent nominal redresat de aproape 2000 A s-au prevăzut din motivele arătate în § 2.3.2.4., cu o instalație de redresare rotativă polifazată cu comutație serie, care se conectează la o înfășurare polifazată a indusului excitatoarei cu două căi de curent în paralel de tipul reprezentat în figurile 2.10, 2.11, 2.12.

Soluția constructivă cunoscută pentru realizarea instalației de redresare rotativă polifazată constă în cuplarea di-

odelor în interiorul unui inel de oțel, montat pe arborele excita-
toarei. Dezavantajele acestei soluții constau în următoarele: gre-
utatea mare a inelului de oțel; necesitatea unor diode speciale cu
contact sub presiune; lipsa diodelor montate în paralel pe aceeași
fază.

Instalația de redresare rotativă poli-fazăată propusă, care
a obținut brevetul de invenție numărul 78432 - grupa 27 - OSIM (in-
ventator ing. P. Chioncel - titular COSITEN Reșița) înlătură deza-
vantajele de mai sus, prin aceea că, utilizează niște diode pola-
rizate direct și invers, montate în paralel în piese de răcire din
aluminiu, conectate între ele și fixate pe două discuri de sticlo-
stratitex, plasate pe arborele excita-toarei.

În figura 2.23 este reprezentată o secțiune a instala-
ției de redresare rotitoare respective, în figura 2.24 o vedere
parțială a instalației, iar în figura 2.25 schema de conexiune a
instalației.

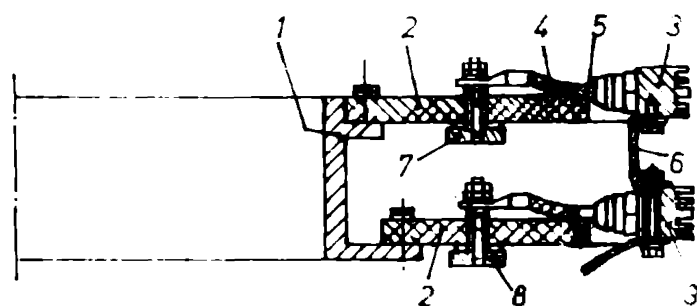


Fig. 2.23

Instalația de redresa-
re rotativă se compune
(figura 2.23) din bu-
tucul (1), pe care s
fixează discurile de
sticlostratitex (2)
Pe acestea se monte-
ază piesele de răcire
din aluminiu (3), ce
conțin diodele pola-
zate direct (4) și di-
odele polarizate in-
vers (5). Cele două

piese de răcire aferente fiecărei faze, sînt conectate prin legă-
tura (6). Tensiunea și curentul redresat sînt colectate de inele-
te (7) și (8) reprezentate simbolic în figura 2.25 și sînt trans-
mise direct înfășurării rotorice a generatorului principal (9).
Alimentarea instalației de redresare rotitoare se realizează cu
tensiunile și curenții alternativi din fazele a...n, și induc-
tului excita-toarei poli-fazăate conectate în poligon. (10).

Diodele redresoare polarizate direct (4), montate câte
două în paralel pe o piesă de răcire (3) și cele polarizate in-
vers, montate de asemenea pe o piesă de răcire identică (3), pla-
sează simetric pe celălalt disc de sticlostratitex (2), corespun-
dând

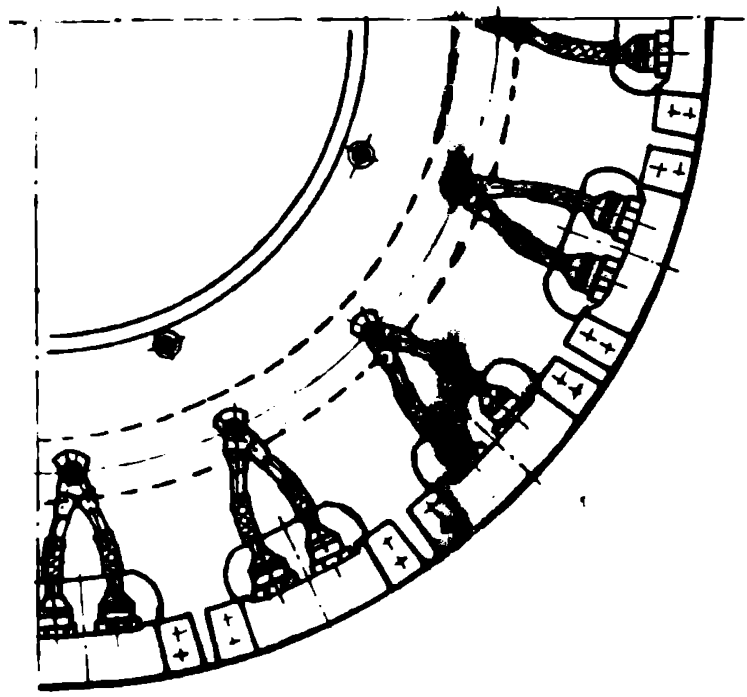


Fig. 2.24

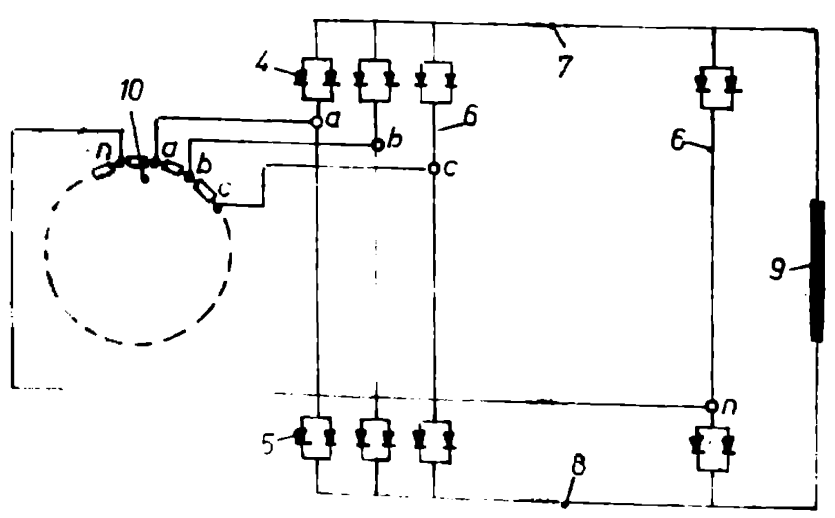


Fig. 2.25

cite unei faze din inelului excitatoarei și sînt conectate între ele, respectiv la inelele (7) și (8), conform schemei de conexiuni a instalației din figura 2.23.

Prin aplicarea invenției se obțin următoarele avantaje: se reduce greutatea instalației de redresare, în comparație cu cele cu inel suport din oțel, micșorînd greutatea de ansamblu a excitatoarei polifazate cu redresare rotativă; prin realizarea conexiunii între pișoale de răcire, se obține o soluție constructivă compactă și rigidă, asigurînd totodată posibilitatea introducerii diodelor în paralel și din instalație se obține o tensiune și un curent redresat cu un factor de ondulație mai redus decît în cazul punții trifazate de redresare.

Instalația de redresare rotativă conform brevetului de invenție este aplicată pentru prima dată la excitatoarele sincrone polifazate care echipază hidrogeneratoarele de 125000 kW, 300 rps de la centrale hidroelectrice de pe Rîul Mare Petreșet, cele mai mari unități realizate pînă în prezent în țara noastră în concepție proprie.

Excitatoarele sincrone polifazate cu instalație de redresare rotativă cu comutație serie pentru CEM Rîul Mare Petreșet s-a executat la Intreprinderea de Construcții de Mașini Reșița unde s-a și făcut încercările, obținîndu-se parametrii din proiect stîți în regim nominal (tensiuni, curenți, factor de utilizare, etc.) și în regimurile tranzitorii (tensiunea de forțare, viteza de excitație, etc.).

2.4. Caracteristicile excitatoarei sincrone

Excitatoarele se caracterizează, după cum s-a mai menționat printr-o dimensionare mai largă a circuitului magnetic, în scopul asigurării unor constante de timp și viteze de răspuns minime; valurile corepunătoare saturăției se sting doar în cursul procesului de forțare a excitației, pe o perioadă de timp scurtă, de ordinul secundelor.

În funcționarea excitatoarei case se studiază, în domeniul larg în care circuitul magnetic este nesaturat, se poate face uz de teoria liniară, adică se poate considera că parametrii mașinii (rezistențe și inductivități) sînt constanți.

Excitatoarele sincrone, (pentru a obține o repartiție precisă sinusoidală, spațial pe perimetrul mașinii), de tipul considerat, se întrefieră variabil în lungul tălpilor polare și prezintă două axe de simetrie în cadrul statorului electric. Ce urmare în-

ducția magnetică creștă de stator (inductor) e fixă în spațiu și constantă ca valoare, de formă:

$$B_{x,t} = B_m \cos \frac{x}{\tau} \pi \quad (34)$$

Pentru ca mașina să prezinte un câmp determinat, înseamnă că și câmpul de recepție trebuie să fie imobil, respectiv constant ca valoare, rotorul polifazat creând un câmp magnetic rotitor de turație "n" de sens contrar sensului de rotație al rotorului astfel ca să se obțină un câmp magnetic resultant fix în spațiu și de valoare determinată.

Considerăm deci cazul unei excitații sincrone care are două axe de simetrie magnetică, (figura 2.26) notate axa "d" și axa "q", în cuadratură electrică, cu repartiția sinusoidală a inducției magnetice în lungul polului polar. Pentru a obține repartiția sinusoidală a solenității în lungul polului polar, reducem mașina la una "echivalentă" cu poli plini, având schema electrică din figura 2.27, (partea haurată, reprezentând interstițiului care determină reluctanțe magnetice diferite după cele două axe) pentru care se admit condițiile:

- circuitul magnetic al mașinii este nesaturat și are $\mu_{Fe} = \infty$
- toate înfășurările mașinii sînt repartizate sinusoidal de-a lungul polului polar;
- întrefierul mașinii este constant în lungul polului polar.

Deoarece excitația sincronă este utilizată în regim de generator se alege asocierea sensurilor pozitive pentru înfășurarea de excitație corespunzător consumatorului, iar pentru înfășurarea rotorului corespunzător sursei.

În aplicarea teoriei celor două axe, sînd în vedere inversarea rolului statorului și rotorului, se stabilesc condițiile de funcționare ale excitației în sistemul "d"- "q" pentru situația faptică, considerînd o mașină echivalentă prin care să se ajungă la un caz analog cu mașina sincronă clasică, aceste condiții fiind deci de concepție originară. În acest sens, se consideră o mașină ideală echivalentă din punct de vedere energetic cu mașina dată (figura 2.26) caracterizată prin: rotorul (indusul) imobil și statorul (inductorul) exterior lui mobil rotindu-se cu turație "n", în sens invers celui cu care se rotește rotorul în realitate, (astfel ca sensul și valoarea relativă a turației înfășurării din indus, față de cea a inductoare să rămîni neschimbată).

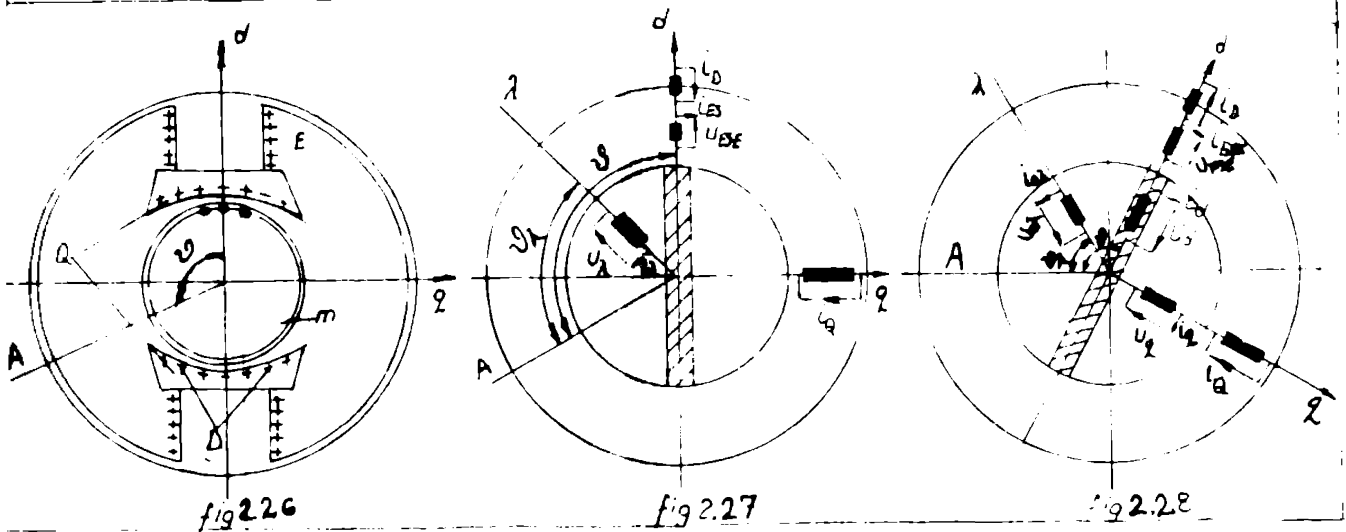
În acest caz se poate lua ca axă de referință "d", axa

fazei I și înfășurării indușului. Axă fazei rotorice de ordinul " λ " face unghiul " ν_λ " cu axa de referință, unde ($\nu_r = 0$)

$$\nu_\lambda = (\lambda - 1) \frac{2\pi}{m} \quad (35)$$

mașina fiind simetrică.

Deci, în cazul convenției enunțate mai sus, a înlocuirii mașinii cu una având statorul "rotitor" invers, în rotorul mașinii echivalente (deci $m=3$, rotor trifazat), conform modului de manifestare a cîmpului de rezecție, există două înfășurări mobile, după axa "d" respectiv "q", care se rotesc cu turația "n" și sînt "m" faze fixe (caz particular: $m=3$ faze decalate cu 120° electrice), corespunzînd fluxurilor de dispersie. De asemenea mașina din figura 2.28 are aceeași întrefier, același diametru și aceeași număr de perechi de poli cu mașina din figura 2.27.



În cazul regimului tranzitoriu al mașinii, curenții, tensiunile și unghiul de poziție " ν " variază în timp.

Considerăm faza rotorică de ordinul " λ ", înfășurările "d", "q", "e", înfășurarea de excitație "E" și înfășurarea de amortizare echivalentă cu două înfășurări separate scurtcircuitate "D" și "Q" și notăm:

$R, R_d, R_q, R_e, R_D, R_Q, R_E$ - rezistențele electrice ale înfășurărilor d, q, e, D, Q, E;

$U, U_d, U_q, U_e, U_{EAE}$ - tensiunile la borne

$N, N_d, N_q, N_e, N_D, N_Q, N_E$ - numerele de spire corespunzătoare

"p" - numărul perechilor de poli

Pentru faza " λ " a mașinii reale (figura 2.27) avem:

$$u_{ES\lambda} = -R_{ES\lambda} i_{ES\lambda} - \frac{d\psi_{ES\lambda}}{dt} \quad (36)$$

Pentru înfășurarea de excitație din stator cu caracter de "circuit receptor":

$$u_{ESE} = R_{ESE} i_{ESE} + \frac{d\psi_{ESE}}{dt} \quad (37)$$

Numerele de spire N , N_d , N_q , N_o pot fi alese arbitrar, dar pentru simplificarea calculului se consideră:

$$N_o = N_d = N_q = N \quad (38)$$

Ecuațiile ansamblului rotor-stator rezultă pe baza ecuațiilor de transformare a curenților, tensiunilor și fluxurilor stabilite între situația reală (m -faze în rotor) și situația echivalentă dorită cu 2 înfășurări fictive, în axele "d" și "q".

Ecuațiile de transformare a curenților rotoriei rezultă din condiția egalității solenștilor, între mașina reală și mașina echivalentă (B 2.2):

$$\begin{aligned} i_d &= \sum_{\lambda=1}^m i_{ES\lambda} \cos(\vartheta - \vartheta_{\lambda}') \\ i_q &= - \sum_{\lambda=1}^m i_{ES\lambda} \sin(\vartheta - \vartheta_{\lambda}') \end{aligned} \quad (39)$$

$$i_{o\vartheta} = i_{ES\vartheta} - \frac{2}{m} \sum_{\lambda} i_{ES\lambda} \cos(\vartheta_{\lambda}' - \vartheta_{\vartheta})$$

$$i_{ES\vartheta} = \frac{2}{m} [i_d \cos(\vartheta - \vartheta_{\vartheta}) - i_q \sin(\vartheta - \vartheta_{\vartheta})] + i_{o\vartheta}$$

Ecuațiile de transformare a tensiunilor din rotor, rezultă din condiția ca suma puterilor electrice ale înfășurărilor mașinii reale să fie egale cu suma puterilor electrice ale înfășurărilor mașinii echivalente (B 2.2).

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{2}{m} \sum_{\lambda=1}^m u_{ES\lambda} \cos(\vartheta - \vartheta_{\lambda}') \\ u_q &= - \frac{2}{m} \sum_{\lambda=1}^m u_{ES\lambda} \sin(\vartheta - \vartheta_{\lambda}') \end{aligned} \quad (40)$$

$$u_{o\vartheta} = u_{ES\vartheta} - \frac{2}{m} \sum_{\lambda=1}^m u_{ES\lambda} \cos(\vartheta_{\lambda}' - \vartheta_{\vartheta})$$

$$u_{ES\vartheta} = u_d \cos(\vartheta - \vartheta_{\vartheta}) - u_q \sin(\vartheta - \vartheta_{\vartheta}) + u_{o\vartheta}$$

Ecuațiile de transformare a fluxurilor din rotor rezultă din condiția egalității energiilor magnetice fiind, similare cu ecuațiile tensiunilor (32)

$$\begin{aligned}\psi_d &= \frac{2}{m} \sum_{\lambda} \psi_{ES\lambda} \cos(\nu - \nu_{\lambda}) \\ \psi_q &= -\frac{2}{m} \sum_{\lambda} \psi_{ES\lambda} \sin(\nu - \nu_{\lambda}) \\ \psi_{0\lambda} &= \psi_{ES\lambda} - \frac{2}{m} \psi_{ES\lambda} \cos(\nu_{\lambda} - \nu_{0\lambda}) \\ \psi_{ES\lambda} &= \psi_d \cos(\nu - \nu_{\lambda}) - \psi_q \sin(\nu - \nu_{\lambda}) + \psi_{0\lambda}\end{aligned}\quad (41)$$

Înlocuind $\psi_{ES\lambda}$, $i_{ES\lambda}$, $\psi_{ES\lambda}$ din (39, 40, 41) în (36) și punind condiția de egalitate (36) să fie satisfăcută indiferent de vâloșile lui " ν ":

$$\begin{aligned}u_d \cos(\nu - \nu_{\lambda}) - u_q \sin(\nu - \nu_{\lambda}) + u_{0\lambda} &= -\frac{2}{m} R_{ld} i_d \cos(\nu - \nu_{\lambda}) + \frac{2}{m} R_{lq} i_q \sin(\nu - \nu_{\lambda}) - \\ &\quad - R_{l0\lambda} i_{0\lambda} - \frac{d\psi_d}{dt} \cos(\nu - \nu_{\lambda}) + \psi_d \frac{d\nu}{dt} \sin(\nu - \nu_{\lambda}) + \\ &\quad + \frac{d\psi_q}{dt} \sin(\nu - \nu_{\lambda}) + \psi_q \frac{d\nu}{dt} \cos(\nu - \nu_{\lambda}) - \\ &\quad - \frac{d\psi_{0\lambda}}{dt}\end{aligned}\quad (42)$$

Notăm:

$$R_d = R_q = \frac{2}{m} R_l; \quad R_{0\lambda} = R$$

și punind condiția ca, factorii care înmulțesc pe $\sin(\nu - \nu_{\lambda})$, $\cos(\nu - \nu_{\lambda})$ și suma termenilor liberi să fie nuli atunci relația (42) devine echivalentă cu:

$$\begin{aligned}u_d &= -R_d i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d \frac{d\nu}{dt} \\ \dots \quad u_q &= -R_q i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_q \frac{d\nu}{dt} \\ u_{0\lambda} &= -R_{0\lambda} i_{0\lambda} - \frac{d\psi_{0\lambda}}{dt}\end{aligned}\quad (43)$$

care reprezintă ecuațiile dintre curenți și tensiuni pentru înfășurările rotative ale mașinii echivalente.

Pentru înfășurările statice ale mașinii echivalente ecuațiile de transformare se deduc din cele ale mașinilor rotative în care se face $\omega = 0$.

Ecuațiile mașinii echivalente, la care fluxurile se reprezintă prin inductivitățile proprii și mutuale la care se adaugă și ecuația mișcării sînt:

$$\begin{aligned}
 u_d &= -R_d i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_2 \frac{d\omega}{dt} & \psi_d &= L_{dd} i_d + L_{dD} i_D + L_{Ed} i_{ESE} \\
 u_q &= -R_q i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\omega}{dt} & \psi_q &= L_{qq} i_q + L_{qQ} i_Q \\
 u_{o\lambda} &= -R_{o\lambda} i_{o\lambda} - \frac{d\psi_{o\lambda}}{dt} & \psi_{o\lambda} &= L_{o\lambda} i_{o\lambda} \\
 u_{ESE} &= R_{ESE} i_{ESE} + \frac{d\psi_{ESE}}{dt} & \psi_q &= L_{qQ} i_q + L_{qQ} i_Q \\
 0 &= R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} & \psi_{ESE} &= L_{dE} i_d + L_{DE} i_D + L_{EE} i_{ESE} \\
 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} & \psi_D &= L_{dD} i_d + L_{DD} i_D + L_{ED} i_{ESE} \\
 & & M_m &= p(i_d \psi_q - i_q \psi_d) + \frac{\gamma}{p} \frac{d^2 \theta}{dt^2}
 \end{aligned} \tag{44}$$

Decorece, după cum s-a văzut la studiul înfășurării de indus al excitatoarei, nu este necesară prevederea înfășurării de amortizare (D, Q); cu atât mai mult cu cât aceste strage după sine pierderi suplimentare, care apar chiar în această înfășurare, iar din punctul de vedere al vitezei de răspuns al excitatoarei, înfășurarea de amortizare este un element defavorabil, deoarece se opune variațiilor rapide ale fluxului înecând ea, ecuațiile (44) obțin în cazul excitatoarei studiate forma mai simplă:

$$\begin{aligned}
 u_d &= -R_d i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_2 \frac{d\omega}{dt} & \psi_d &= L_{dd} i_d + L_{Ed} i_{ESE} \\
 u_q &= -R_q i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\omega}{dt} & \psi_q &= L_{qq} i_q \\
 u_{o\lambda} &= -R_{o\lambda} i_{o\lambda} - \frac{d\psi_{o\lambda}}{dt} & \psi_{o\lambda} &= L_{o\lambda} i_{o\lambda} \\
 u_{ESE} &= R_{ESE} i_{ESE} + \frac{d\psi_{ESE}}{dt} & \psi_{ESE} &= L_{dE} i_d + L_{EE} i_{ESE} \\
 & & M_m &= p(i_d \psi_q - i_q \psi_d) + \frac{\gamma}{p} \frac{d^2 \theta}{dt^2}
 \end{aligned} \tag{45}$$

Ecuațiile sînt scrise în valori momentane cu o variație care crește în raport cu timpul. În timpul proceselor electromagnetice tranzitorii (forțare, deexcitare), turatia rămîne aproape constantă, variînd puțin, în care caz se poate admite:

$$\frac{d\nu}{dt} = \text{const.} \quad \text{unde} \quad \nu = \omega t$$

În acest caz se utilizează calculul operațional (transformata Laplace-Carson) plecînd de la ecuațiile (45) scrise în mărimi raportate (de obicei notate cu litere mici):

$$\begin{aligned} u_d &= -r_d i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_g \frac{d\nu}{dt} & \psi_d &= x_d i_d + i_{ESE} \\ u_g &= -r_g i_g - \frac{d\psi_g}{dt} - \psi_d \frac{d\nu}{dt} & \psi_g &= x_g i_g \\ u_{o\lambda} &= -r_{o\lambda} i_{o\lambda} - \frac{d\psi_{o\lambda}}{dt} & \psi_{o\lambda} &= x_{o\lambda} i_{o\lambda} \\ u_{ESE} &= i_{ESE} + T_{ESE} \frac{d\psi_{ESE}}{dt} & \psi_{ESE} &= x_d (1 - \sqrt{\sigma_{DE}}) i_d + i_{ESE} \end{aligned} \quad (46)$$

Ecuația momentului nu s-a scris fiind o ecuație de determinare al lui "M_u" cînd fluxurile și curenții sînt cunoscute.

În ecuațiile (46) s-au notat mărimile raportate (noteșii per-unit):

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{U_{d0}}{\sqrt{2} U_{dn0}} ; \quad i_d = \frac{i_{d0}}{\sqrt{2} I_{dn0}} ; \quad \psi_d = \frac{\psi_{d0} \omega_{n0}}{\sqrt{2} U_{dn0}} ; \quad \psi_g = \frac{\psi_{g0} \omega_{n0}}{\sqrt{2} U_{dn0}} ; \quad r_d = R_{d0} \frac{I_{dn0}}{U_{dn0}} \\ t = \omega_{n0} t_0 ; \quad u_g &= \frac{U_{g0}}{\sqrt{2} U_{gn0}} ; \quad i_g = \frac{i_{g0}}{\sqrt{2} I_{gn0}} ; \quad r_g = R_{g0} \frac{I_{gn0}}{U_{gn0}} ; \quad u_{o\lambda} = \frac{U_{o\lambda 0}}{\sqrt{2} U_{dn0}} \\ i_{o\lambda} &= \frac{i_{o\lambda 0}}{\sqrt{2} I_{dn0}} ; \quad r_{o\lambda} = R_{o\lambda 0} \frac{I_{dn0}}{U_{dn0}} ; \quad \psi_{o\lambda 0} = \frac{\psi_{o\lambda 0} \omega_{n0}}{\sqrt{2} U_{dn0}} ; \quad u_{ESE} = \frac{U_{ESE} \omega_{n0} L_{Ed0}}{\sqrt{2} U_{dn0} R_{E0}} \\ L_{ESE} &= i_{ESE} \frac{L_{Ed0}}{\sqrt{2} U_{dn0}} ; \quad T_{ESE} = \frac{\omega_{n0} L_{EE0}}{R_{E0}} ; \quad \psi_{ESE} = \psi_{ESE0} \frac{\omega_{n0} L_{Ed0}}{\sqrt{2} U_{dn0} L_{EE0}} \\ x_d &= \frac{L_{dd0} \omega_{n0} I_{dn0}}{U_{dn0}} ; \quad x_g = \frac{L_{gg0} \omega_{n0} I_{gn0}}{U_{gn0}} ; \quad x_{o\lambda} = \frac{L_{o\lambda 0} \omega_{n0} I_{dn0}}{U_{dn0}} \\ \sigma_{DE} &= 1 - \frac{L_{DE0} L_{Ed0}}{L_{dd0} L_{EE0}} ; \quad \omega = \frac{\omega_0}{\omega_{n0}} \end{aligned}$$

La transpunerea ecuațiilor (46) în planul variabilei complexe "p" prin intermediul funcțiilor imagine, se respectă următoarele convenții:

- pentru simplificarea scrierii se neglijează indicii care arată exprimarea mărimilor în unități relative și notațiile pentru funcțiile imagine;
- unitățile de bază pentru rotor sînt alese astfel încît la trecerea în coordonate "d", "q" să se asigure relații de reciprocitate pentru inductivitățile mutuale dintre stator și rotor.

Ecuațiile în planul variabilei complexe "p" prin intermediul funcțiilor imagine devin:

$$u_d = -r_d i_d - p(\psi_d - \psi_{d0}) + \omega \psi_q \quad \psi_d = x_d i_d + i_{ESE}$$

$$u_q = -r_q i_q - p(\psi_q - \psi_{q0}) - \omega \psi_d \quad \psi_q = x_q i_q$$

$$u_{o2} = -r_{o2} i_{o2} - p(\psi_{o2} - \psi_{o20}) \quad \psi_{o2} = x_{o2} i_{o2}$$

$$u_{ESE} = i_{ESE} + T_{ESE} p(\psi_{ESE} - \psi_{ESE0}) \quad \psi_{ESE} = x_d (1 - \sigma_{DE}) i_d + i_{ESE}$$

unde mărimile sînt de forma:

$$u_d(p) = p \int_0^{\infty} u_d(t) e^{-pt} dt.$$

Capitolul III

OXECUTAREA EXCITAȚIEI SINCRONE CU DIODE ROTATIVE ÎN REGIM TRANZITORIU

3.1. Modelarea matematică a excitației sincrone care încorporează pe sursă un redresor pentru studiul procesului de comutație și al regimurilor tranzitorii

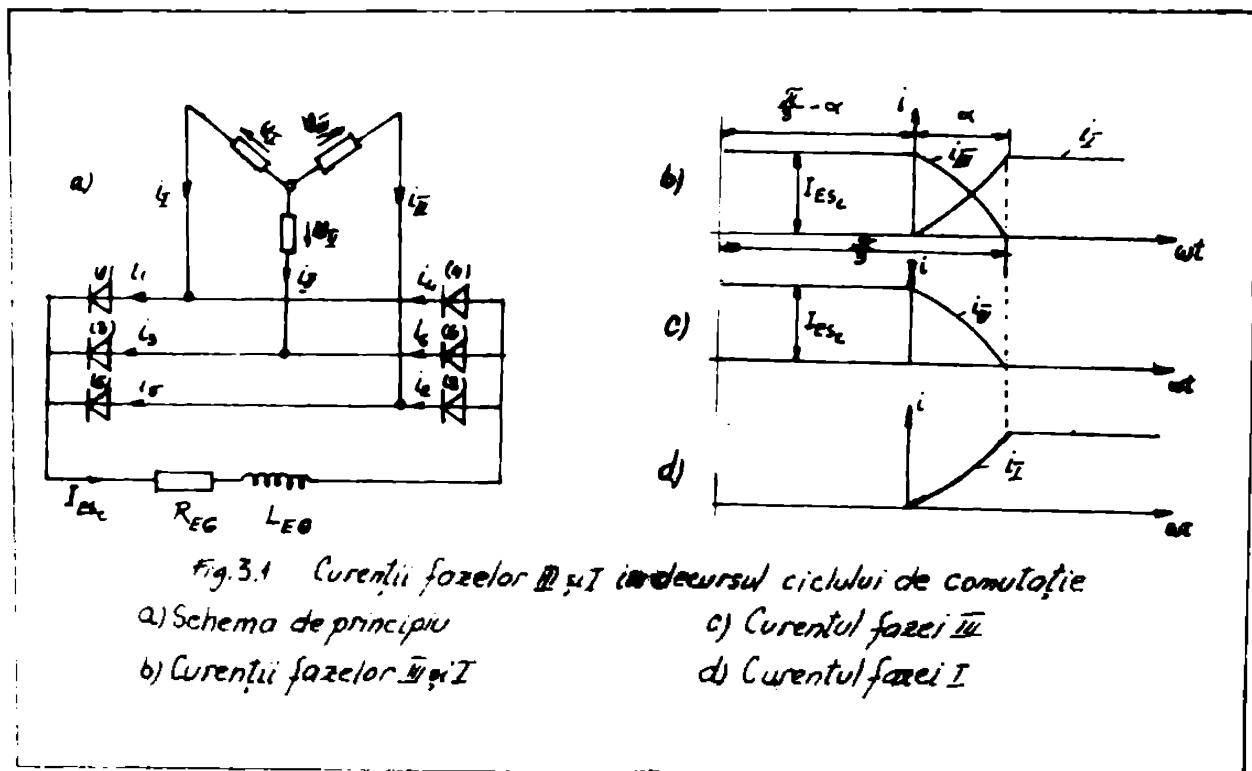
Analizarea funcționării excitației sincrone cu redresor rotativ se reduce de fapt la examinarea modului de funcționare a unui generator sincron, "inversat", care debitează pe o sarcină constituită din înfășurarea rotorică a generatorului sincron principal, printr-un redresor rotativ cu diode.

Pentru calculul curenților și tensiunilor excitației sincrone, așa cum rezultă din ecuațiile (47) stabilite pentru regimul tranzitoriu în teoria celor două axe (Park), este necesar să se cunoască un număr mare de parametri (rezistențe și reactanțe), care se determină cu relațiile cunoscute de la mașinile sincrone, particularizate pentru situația circuitului magnetic la care rotorul este indus și statorul inductor.

Se va analiza mai înainte, procesul de comutație la excitația sincronă cu diode rotative și apoi procesele tranzitorii în cazul generatoarelor sincrone prevăzute cu acest sistem de excitație.

Determinarea curenților și tensiunilor sistemului de excitație este complexă, din cauze dependentei procesului de comutație și redresorului de poziție unghiulară a rotorului și necesitatea determinării reacției indusului corespunzătoare formei nesinusoidale a curenților din indus. Urmăria, de exemplu în schema trifazată în punte (figure 3.1.2) comutația curentului de pe ventilul "5" pe ventilul "1" sau de pe faza III pe faza I. În timpul comutației curenții variază în fază, așa cum se arată în figure 3.1.6.

Acești curenți se pot descompune în partea continuă respectiv variabilă, ca în figure 3.1.6,d. Din această figură rezultă că, curentul în faza I este curentul de scurtcircuit bifază brusc, iar curentul în faza II este suma curentului de scurtcircuit cu componenta continuă I_{SC} . De aceea se va utiliza metoda suprapunerii și se examinază cele două procese: trecerea curentului continuu și a celui de scurtcircuit brusc. În intervalul de timp pre-



mergător comutației, pe fazele II și III sporește curentul continuu. De aceea curentul continuu parcurge aceste faze în decursul întregului ciclu de comutație.

La trecerea curentului continuu prin fazele II și III solenția rezultantă este deci mai mare decât amplitudinea solenției la trecerea curentului de fază. Ținând seama de acestea se pot determina fluxurile totale ale fazei I, apoi a fazele II și III (B 70) de forma:

$$\begin{aligned} \psi_{II} &= \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} I_{ESc} \sin 2\omega t \\ \psi_{III} &= -\frac{x_2'' + x_d''}{2} I_{ESc} - \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} I_{ESc} \sin(2\omega t + \frac{\pi}{3}) \\ \psi_{II} &= \frac{x_2'' + x_d''}{2} I_{ESc} - \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} I_{ESc} \sin(2\omega t - \frac{\pi}{3}) \end{aligned} \quad (48)$$

unde " ωt " este unghiul axei fazei I față de axa "d", iar frecvența în acest caz este dublă. Cum se observă din expresia fluxurilor totale, la rotirea rotorului ele se modifică. De aceea, trecerea curentului continuu induce, prin variația fluxurilor tensiuni electromotoare în înfășurările indusului:

$$\begin{aligned}
 U_{c_I} &= -\frac{d\psi_I}{d(\omega t)} = -2 \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} I_{Esc} \cos 2\omega t \\
 U_{c_{II}} &= \frac{d\psi_{II}}{d(\omega t)} = 2 \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} I_{Esc} \cos(2\omega t + \frac{\pi}{3}) \\
 U_{c_{III}} &= \frac{d\psi_{III}}{d(\omega t)} = 2 \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} I_{Esc} \cos(2\omega t - \frac{\pi}{3})
 \end{aligned} \tag{49}$$

Dar în timpul procesului de comutație prin fazele I și III trece curentul "i" (figura 3.1). Solenațiile fazelor I și III determinate de acest curent sînt decalate cu unghiul "2π/3" față de solenațiile fazelor II și III arătate mai sus. Fluxurile determinate de curentul "i" sînt : (B.70):

$$\begin{aligned}
 \psi_I &= \frac{x_2'' + x_d''}{2} i - \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} i \sin(2\omega t + \frac{\pi}{3}) \\
 \psi_{II} &= \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} i \sin(2\omega t - \frac{\pi}{3}) \\
 \psi_{III} &= -\frac{x_2'' + x_d''}{2} i + \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} i \sin 2\omega t
 \end{aligned} \tag{50}$$

Acestea produc în timpul comutației în înfășurările indușului tensiunile electromotoare U'_{c_I} , $U'_{c_{II}}$ și $U'_{c_{III}}$ de forma : (B.70)

$$\begin{aligned}
 U'_{c_I} &= -p \left[\frac{x_2'' + x_d''}{2} i - \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} i \sin(2\omega t + \frac{\pi}{3}) \right] \\
 U'_{c_{II}} &= -p \left[\frac{x_2'' + x_d''}{2} i \sin(2\omega t - \frac{\pi}{3}) \right] \\
 U'_{c_{III}} &= p \left[\frac{x_2'' - x_d''}{2} i - \frac{x_2'' - x_d''}{\sqrt{3}} i \sin 2\omega t \right]
 \end{aligned} \tag{51}$$

În timpul comutației tensiunile fazelor excitatoarei rezultă prin însumarea tensiunilor date de relațiile (49) și (51):

$$\begin{aligned}
 U_{Esc_I} &= U_{c_I} + U'_{c_I} \\
 U_{Esc_{II}} &= U_{c_{II}} + U'_{c_{II}} \\
 U_{Esc_{III}} &= U_{c_{III}} + U'_{c_{III}}
 \end{aligned} \tag{52}$$

Se poate determina apoi valoarea medie a tensiunii redresate U_{α} (B.70) prin integrarea :

$$U_{Esc} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{3}}^{\alpha} (U_{Esc_{II}} - U_{Esc_{III}}) d\omega t \tag{53}$$

diferenței de tensiune " $U_{Esc_{II}} - U_{Esc_{III}}$ " pe două intervale de timp de la $(\alpha - \frac{\pi}{3})$ la "0" și de la "0" la " α ", deoarece prezintă salt în momentul conectării ventilului l.

Determinarea reacției de indus necesită și cunoașterea curentului de comutație $i=f(t)$.

Curentul "i" pe timpul comutației variază după o lege foarte complexă, rezultatele obținându-se sub forma unor sisteme de ecuații algebrice și trigonometrice a căror rezolvare se face sub formă numerică (B 70). Complicarea caracterului de variație al curentului "i" rezultă în primul rând din dependența impedanțelor excitatoarei de poziția unghiulară a inductorului și în al doilea rând din aceea că trecerea curentului continuu redresat, prin variația de flux, determină tensiuni electromotoare induse suplimentare în înfășurările indusului.

Formulele pentru curentul "i" în timpul comutației se pot simplifica, dacă curentul se descompune în serie armonică și din această descompunere se reține numai fundamentală și componenta continuă. La o asemenea simplificare, curba curentului de fază obține alt aspect, iar fundamentală curentului de fază se modifică într-ucîtva, ca valoare și ca defazaj (dar se presupune că valoarea medie a curentului redresat rămîne nemodificată). Dacă se ține seamă că, curentul de excitație al excitatoarei rămîne constant, atunci se modifică tensiunile electromotoare induse determinate de procesul de comutație. De aceea trecînd la curba simplificată a curentului se utilizează în același timp tensiunile electromotoare induse echivalente sau de calcul.

Neglijînd tensiunile electromotoare suplimentare din înfășurările indusului, curentul de comutație obține următoarea expresie aproximativă (B 70):

$$i = \frac{\sqrt{6} U_{bc}}{2 X_c} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \omega t)] \quad (54)$$

unde reactanța de comutație X_c care determină durata procesului de comutație, în cazul excitatoarei fără înfășurare de amortizare este:

$$X_c = \frac{X_d + X'_d}{2} \quad (55)$$

În abordarea generală a studiului proceselor tranzitorii în excitatoarea sincronă cu diode retative se are în vedere că, în timpul acestora, se modifică cîmpul de reacție al indusului atît ca valoare cît și ca direcție. Modificarea reacției de indus ca valoare este cauzată de modificarea curentului redresat " I_{ES0} " și modificarea reacției de indus ca direcție este datorată unghiului de comutație " α ".

Reacția de indus depinde de fundamentală curentului din indus " I_{ES1} " care trebuie introdus în ecuațiile excitatoarei.

La excitatoarea sincronă cu diode rotative, prevăzută cu înfășurare de amortizare, pentru studiul proceselor tranzitorii se pot scrie sub formă matricială următoarele ecuații :

$$\begin{bmatrix} U_{ES} \sin \theta \\ -U_{ES} \cos \theta \\ U_{ESE} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_d - x_c) p & x_2 - x_c & x_{ad} p & x_{ad} p & x_{aq} \\ -(x_d - x_c) & (x_2 - x_c) p & -x_{ad} & -x_{ad} p & x_{aq} p \\ x_{ad} p & & r_{eq} + x_{ad} p & x_{ad} & \\ x_{ad} p & & x_{ad} p & r_{ot} + x_{ad} p & \\ & x_{aq} p & & & r_{ra} + x_{aq} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{ES} \sin(\theta + \varphi_1) \\ I_{ES} \cos(\theta + \varphi_1) \\ I_{ESE} \\ I_{kD} \\ I_{kQ} \end{bmatrix} \quad (56)$$

În relațiile de mai sus indicele "k" se referă la circuitul echivalent de amortizare, iar " $\theta + \varphi_1$ ", se referă la unghiul de defazaj dintre fundamentala curentului și componenta tensiunii după axa "d". Reactanțele corespunzătoare inductivităților mutuale s-au luat aici aceleași și egale cu " x_{ad} " respectiv " x_{aq} ". Deoarece curenții " I_{kD} " și " I_{kQ} " din circuitul de amortizare se pot elimina, în ecuațiile (56) rămân 5 necunoscute " U_{ES} ", " I_{ES} ", " θ ", " φ_1 " și " I_{ESE} ". De aceea pentru determinarea variabilelor arătate sînt necesare două ecuații suplimentare. Pe de altă parte, rezolvarea acestor ecuații trebuie să se facă simultan cu rezolvarea ecuațiilor generatorului principal. Ecuația care leagă generatorul principal cu excitatoarea sincronă cu diode rotative este (B 70):

$$x_{ep} I_{ES} + R_{EG} I_{ES} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{ESm} - \frac{3}{\pi} x_c I_{ES} - (2 - \frac{3r_{es}}{2\pi}) r_{es} I_{ES} - 2\Delta U \quad (57)$$

Dacă înfășurările indușului generatorului principal sînt legate la rețea, atunci se utilizează " x_{EGE} " - reactanța echivalentă a înfășurării de excitație a acestui generator. Astfel ecuația de mai sus devine (B 70):

$$x_{EGE} p I_{ES} + R_{EG} I_{ES} = U_{ESc} \quad (58)$$

Dacă miezul magnetic al mașinii este saturat se utilizează valoarea dinamică a reacțantei echivalente.

Între " U_{ESc} " și " I_{ESc} " - pe lângă ecuația (57) există o legătură suplimentară exprimată prin caracteristica exterioară a redresorului (B 70):

$$U_{ESc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{ESm} - \frac{3}{\pi} x_c I_{ES} - (2 - \frac{3r_{es}}{2\pi}) r_{es} I_{ES} - 2\Delta U \quad (59)$$

Reglarea curentului de excitație al generatorului principal se realizează prin modificarea curentului de excitație al excitatoarei sincrone.

Dacă înfășurarea de excitație a excitatoarei sinusoare, nu diode rotative este alimentată, la rândul său de la o subexcitație, se poate face un raționament analog și pentru acest grup de mașini (excitatoare - subexcitatoare) în vederea obținerii ecuațiilor ca și pentru excitatoarea și generatorul principal.

Ecuațiile (56) se simplifică dacă excitatoarea sinusoară nu are sistem de amortizare (cazul se va analiza), care intervine în procesul tranzitoriu al generatorului. În acest caz avem :

$$\begin{bmatrix} U_{ES} \sin \theta \\ -U_{ES} \cos \theta \\ U_{ESE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_d - x_c) p & x_2 - x_c & x_{ad} p \\ -(x_d - x_c) & (x_2 - x_c) p & -x_{ad} \\ x_{ad} p & & (x_{ad} + x_{ad} p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -I_{ES} \sin(\theta + \varphi_1) \\ I_{ES} \cos(\theta + \varphi_1) \\ I_{ESE} \end{bmatrix} \quad (60)$$

Dacă se ține cont de faptul că în primele două linii ale ecuațiilor (60) termenii care conțin derivate sînt mici în comparație cu ceilalți și se pot neglija, atunci ecuațiile (60) se simplifică și apar sub forma :

$$U_{ES} \sin \theta = (x_2 - x_c) I_{ES} \cos(\theta + \varphi_1) \quad (61)$$

$$-U_{ES} \cos \theta = (x_d - x_c) I_{ES} \sin(\theta + \varphi_1) - x_{ad} I_{ESE} \quad (62)$$

$$p I_{ESE} = \frac{U_{ESE}}{x_{ad}} - \frac{x_{ad}}{x_{ad}} I_{ESE} + \frac{x_{ad}}{x_{ad}} p I_{ES} \sin(\theta + \varphi_1) \quad (63)$$

Rezolvarea acestor ecuații se poate executa în următoarea ordine :

- 1) Precizăm valorile inițiale ale variabilelor prin condițiile inițiale date,
- 2) Determinăm ΔI_{ES} și I_{ES} apoi φ_1 și I_{ES} ,
- 3) Calculăm " U_{ES} " și " θ " cu ecuațiile (61), (62)
- 4) Calculăm pe " U_{ESE} " și cu ecuația (63) determinăm $p \Delta I_{ESE}$ și apoi I_{ESE} .

În cazul general în timpul procesului tranzitoriu valoarea medie a curentului redresat se poate modifica cu valoarea ΔI_{ES} . De aceea trebuie găsite variabilele după o asemenea variație instantanee a curentului " I_{ES} ". Valoarea inițială este cunoscută pentru " I_{ES0} ". Din condiția menținerii la aceeași valoare a fluxului înfășurării de excitație la variația prin salt a lui " I_{ES} ", după relațiile (60) rezultă :

$$\Delta I_{ESE} = \frac{x_{ad}}{x_{ad}} [(I_{ES10} + \Delta I_{ES}) \sin(\theta_0 + \varphi_{10} + \Delta \theta + \Delta \varphi_1) - I_{ES10} \sin(\theta_0 + \varphi_{10})] \quad (64)$$

în care "0" indică valorile necunoscute înainte începerii variației regimului.

Pentru " ΔU_{ES} " și " $\Delta \theta$ " avem în concordantă cu relațiile (60):

$$(U_{ES0} + \Delta U_{ES}) \sin(\theta_0 + \Delta \theta) = (x_2 - x_c) (I_{ES10} + \Delta I_{ES10}) \sin(\theta_0 + \varphi_{10} + \Delta \theta + \Delta \varphi_{10}) \quad (65)$$

$$(U_{E_s} + \Delta U_{E_s}) \cos(\theta_0 + \Delta \theta) \quad (66)$$

Sistemul de ecuații neliniare are șase necunoscute și se soluționează de obicei în cazuri numerice după care se determină necunoscutele: $U_{E_s} + \Delta U_{E_s}$; $I_{E_s} + \Delta I_{E_s}$; $I_{E_s E} + \Delta I_{E_s E}$; $\theta_0 + \Delta \theta$; $\varphi_0 + \Delta \varphi$

Metodica generală prezentată pentru studiul proceselor tranzitorii la aceste mașini este dificil de aplicat în soluționarea unor situații specifice ce de pildă: problema forțării excitației cu determinarea vitezei de excitație și a deexcitării rapide a excitației. De aceea, în analiza acestor procese tranzitorii se vor admite unele ipoteze simplificatoare valabile în situațiile particulare tratate, iar relațiile stabilite vor avea aplicabilitate generală la proiectarea excitației sincrone cu diode rotative.

3.2. Studiul posibilităților de obținere a unei viteze de excitație corespunzătoare a semnalului de excitație

Regimurile menționate anterior (forțarea excitației, viteză de excitație și deexcitare rapidă a excitației sincrone cu diode rotative), se vor analiza mai jos în funcție de importanța lor pentru buna funcționare a generatoarelor din centralele electrice.

Pentru a obține o funcționare stabilă a generatoarelor sincrone, în special când acestea debitează peste transformatoare, pe linii lungi, care înrăutățesc în general condițiile de stabilitate, se impune să se raporteze la viteza de excitație, exprimată printr-o constantă de timp de substituție pentru întregul sistem de excitație să fie mai mică, să fie și o tensiune plafon să fie mai ridicată. Împlinind aceste condiții se poate admite un raport de mers în gol și de scurtcircuit al generatorului sincron mai mic (raportul de mers în gol și de scurtcircuit, reprezentînd raportul dintre curentul de excitație la mers în gol, respectiv la mers în sarcină nominală și curentul de excitație corespunzător curentului nominal din stator în scurtcircuit trifazat stabilit) obținînd astfel o mașină cu dimensiuni mai mici și deci mai ieftină.

Viteza de excitație prezintă importanță practică doar după primele oscilații, care apar în urma unor deranjamente la

funcționarea în paralel, sistemul de excitație al generatorului sincron trebuie să permită revenirea tensiunii reții polare (U_{RG}) la valoarea inițială și chiar mărire scutită, astfel încât să atingă valoarea tranzitorie (U'_{RG}) după 0,5 sec. de la începerea fuzurii.

În cazul scurtcircuitelor trifazate ale generatorelor sincrone rolul preponderent îl au instalațiile de protecție și de conectare rapidă, viteza sistemului de excitație având un rol important după înălțarea șverlei. În timpul scurtcircuitului curentul de excitație trebuie să se mărească, astfel ca fluxul magnetic resultant al generatorului sincron și deci t.e.m. tranzitorie a înfuzurii statorice să aibă valori cât mai mari în momentul întreprinderii scurtcircuitului.

Din cauza scăderii tensiunii generatorului sincron în momentul scurtcircuitului, regulatorul de tensiune, datorită reacției inverse, intră în acțiune și în consecință curentul debitat de excitatoare începe să crească pînă ajunge la valoarea maximă.

Forțarea excitației împiedică scăderea rapidă a curentului de excitație al generatorului și menține curentul de excitație și deci t.e.m. a generatorului la o valoare ridicată necesară.

La șocuri de sarcină mașina sincronă conectată la rețea pendulează, ceea ce poate determina modificarea excitației datorită reacției regulatorului automat de tensiune, sistemul de excitație putînd determina creșterea oscilațiilor și deconectarea de la rețea a mașinii. Pentru a evita aceasta, pe lângă mărirea amortizării mașinii sincrone se întărește reacția sistemului de excitație, dar aceasta atrage și o micșorare a vitezei de excitație la șocuri grele, însă soluțiile cele mai noi sînt prevăzute cu dispozitive de amortizare a pendulărilor sau de stabilizare.

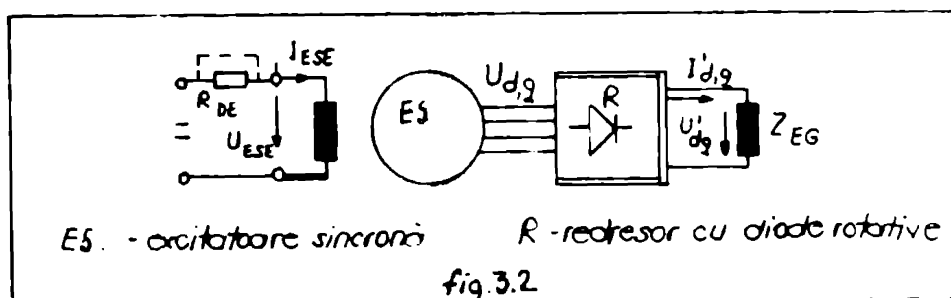
Menținerea constantă a tensiunii la borne, cit și a cimpului generatorului sincron în regia nominal și de șverle impun deci sistemului de excitație o serie de cerințe ca: intruziunea în regulator să fie neglijabilă, constante de timp a excitatoarei cit mai mici, viteza de creștere a excitației cit mai mare și tensiunea plafen ridicată.

La determinarea vitezei de excitație a sistemului de excitație, viteza de reacție a celorlalte elemente (regulator, dispozitiv de comandă, convertizor cu tiristori, etc.) fiind neglijabile, viteza de excitație a sistemului de excitație se reduce pre-

tie la aceea a vitezei de reacție a excitatoarei.

Spre deosebire de excitatoarea de curent continuu, la care reacția indusului este în general neglijabilă și deci viteză de excitație la mare în sarcină se poate confunda cu cea de mare în gol, într-o excitatoare sincronă cu redresor rotativ, efectul reacției indusului excitatoarei asupra fluxului din întrefier este asemănător celui dintr-un generator sincron clasic funcționând la "cos φ " aproape de unitate și deci viteză de excitație în sarcină este diminuată față de cea la mare în gol. (B 57).

Studiul procesului tranzitoriu particular, de forțare a excitației se face, analizând funcționarea unui generator sincron, care lucrează pe sarcină prin redresor, la turație constantă. (figura 3.2.).



Pentru determinarea vitezei de excitație se vor folosi ecuațiile de funcționare stabilite în relațiile (47), la care se adaugă ecuațiile corespunzătoare înfăgurării de excitație a generatorului principal (sarcina excitatoarei) scrise în sistemul "d", "q". Pentru aceasta exprimăm funcția de transfer $U_{d,q}(p)$ în următoarele ipoteze:

- excitatoarea funcționează la parametri nominali: (tensiuni, U_{ES} , U_{ESE} ; curenții I_{ES} , I_{ESE} ; etc.) cunoscuți;
- în momentul $t=0$ se produce o creștere bruscă a tensiunii de excitație a excitatoarei de la valoarea U_{ESE} la valoarea U_{ESE_0} de forțare, dată;
- în ecuațiile scrise în complex, vom neglija componentele hemoperiare, care sînt de valoarea egală pentru fiecare fază și se comportă în mod diferit de componentele d, q; ele nu produc un cimp rotitor, iar mașina reprezintă pentru ele o simplă impedanță. Suma componentelor Park (d,q), ce și s celor simetrice de convență directă și inversă, în sistemul de coordonate adoptat, reprezintă un fenomen rezultat "y" (sau I_0 sau ψ) care se determină din următoarele:

nile date " U_d " și " U_q " astfel: (B 13)

$$\underline{U} = \operatorname{Re}\{U_d\} + j \operatorname{Re}\{U_q\} \quad \text{sau} \quad U_d = U \quad U_q = jU \quad (67)$$

- în baza teoremei suprapunerii efectelor și pentru simplificarea sistemului de ecuații, admitem pentru momentul $t=0$ condiții nule adică în (47) vom face: $\psi_{1d0} = \psi_{1q0} = \psi_{1e0} = 0$

În acest caz, necunoscutele $U_{d,q}$, $i_{d,q}$, $\psi_{d,q}$, etc. reprezintă variațiile acestor mărimi ce se adaugă valorilor inițiale date;

- redresorul rotativ care poate fi în conexiune paralelă (de obicei punte trifazată cu dublă redresare), sau în conexiune serie (tip punte poligonală) este un element neinerțial, care intervine doar printr-un factor de modificare a tensiunii și curentului, din alternativ în continuu (redresat), dependent de tipul redresorului și se caracterizează prin ecuațiile:

$$\begin{aligned} U_d' &= k_1 U_d \\ U_q' &= k_1 U_q \\ i_d' &= k_2 i_d \\ i_q' &= k_2 i_q \end{aligned} \quad (68)$$

unde $U_{d,q}'$, $i_{d,q}'$ - componentele "d", "q" ale tensiunii și curentului redresați;

Factorii k_1 , k_2 , de modificare pentru tensiuni și curenți au expresiile: (conform relațiilor (13), (15), (19), (29), (30)):

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{2m\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} && - \text{pentru redresorul rotativ cu comutație "paralel-dublă"} \\ k_1 &= \frac{m\sqrt{2}}{\pi} && - \text{pentru redresorul rotativ cu "comutație serie"} \\ k_2 &= \sqrt{\frac{m}{2}} && \checkmark \text{ pentru redresor cu comutație paralel-dublă} \\ k_2 &= 2 && - \text{pentru redresor cu "comutație serie", dacă "m" este par;} \\ k_2 &= \frac{2m}{\sqrt{m^2-1}} && - \text{pentru redresor cu "comutație serie", dacă "m" este impar;} \end{aligned}$$

Impedanța de excitație a generatorului principal " Z_{pg} " alimentată de excitația cu redresor rotativ, conține componente directe, inverse și homopolare, dar neglijând componentele homopo-

Lare se poate scrie matricea diagonală a impedanței astfel: (B13):

$$\|Z_{EG}\| = \begin{bmatrix} r_{EG} + p x_{EG} & -x_{EG} \\ x_{EG} & r_{EG} + p x_{EG} \end{bmatrix} \quad (69)$$

Ecuațiile corespunzătoare înfășurării de excitație a generatorului principal, sarcina redresorului sînt:

$$\begin{aligned} U_d' &= (r_{EG} + p x_{EG}) i_d' - x_{EG} i_q' \\ U_q' &= x_{EG} i_d' + (r_{EG} + p x_{EG}) i_q' \end{aligned} \quad (70)$$

Avînd în vedere că, funcționarea excitatoarei este asemănătoare cu a unui generator sincron clasic la "cos φ = 1", deci "φ = 0", vom putea considera cu aproximație în relațiile (47), (69), (70), $i_d \approx 0$ și $x_{EG} \approx 0$; sistemul de ecuații pentru excitatoare, redresor rotativ și sarcină devenind:

$$\begin{aligned} U_d &= \omega x_2 i_q - p L_{ESE} \\ U_q &= -(r_2 + p x_2) i_q - \omega L_{ESE} \\ L_{ESE} &= \frac{U_{ESE}}{1 + p T_{ESE}} \\ U_q &= K r_{EG} i_q \quad \text{iar } K = \frac{x_2}{K_1} \end{aligned} \quad (71)$$

Prin rezolvarea sistemului (71) se obțin valorile absolute ale variațiilor tensiunii:

$$\begin{aligned} |U_d(p)| &= \frac{p^2 + 2p + \omega^2}{(p+\lambda)(1+pT_{ESE})} U_{ESE} \\ |U_q(p)| &= \frac{\beta U_{ESE}}{(p+\lambda)(1+pT_{ESE})} \end{aligned} \quad (72)$$

În (72) s-a notat prin:

$$\lambda = \frac{r_2 + K r_{EG}}{x_2} ; \quad \beta = \frac{K r_{EG} \omega}{x_2} \quad (73)$$

Originele funcțiilor $U_{d,q}(p)$ se determină astfel:

$$\begin{aligned} U_q(t) &= \mathcal{L}^{-1} |U_q(p)| = \frac{\beta U_{ESE}}{1 - \lambda T_{ESE}} \left(e^{-\lambda t} - e^{-\frac{t}{T_{ESE}}} \right) \\ U_d(t) &= \mathcal{L}^{-1} |U_d(p)| = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{U_{ESE}}{T_{ESE}} \left[1 - \frac{p+\lambda - \omega^2 T_{ESE}}{(p+\lambda)(1+pT_{ESE})} \right] \right\} \end{aligned} \quad (74)$$

$$i_d'(t) = \frac{U_{ESE}}{T_{ESE}} \delta(t) + \mathcal{L}^{-1} \frac{U_{ESE}}{T_{ESE}} \frac{p+\lambda - \omega^2 T_{ESE}}{(p+\lambda)(1+pT_{ESE})} \quad (75)$$

unde $\delta(t)$ - impulsul unitate.

Din condiția $U_d(t)=0$ pentru $t=0$ se obține $\delta(t) = \frac{1}{T_{ESE}}$
 iar pentru $t \rightarrow \infty$, $U_d(t) = U_{EF} - U_{EN} = \frac{U_{ESE}}{T_{ESE}}$
 Se obține apoi tensiunea în timpul forțării:

$$U(t) = U_{EN} + (U_{EF} - U_{EN}) \left[1 - R^{-\frac{t}{T_{ESE}}} + \frac{\omega^2 T_{ESE}}{1 - \lambda T_{ESE}} \left(e^{-\lambda t} - R^{-\frac{t}{T_{ESE}}} \right) + j \frac{\beta U_{ESE}}{1 - \lambda T_{ESE}} \left(e^{-\lambda t} - R^{-\frac{t}{T_{ESE}}} \right) \right] \quad (76)$$

În (76) dacă se admite cu aproximație $\lambda \approx \frac{1}{T_{ESE}}$, atunci formula tensiunii în timpul forțării obține o formă mai simplă:

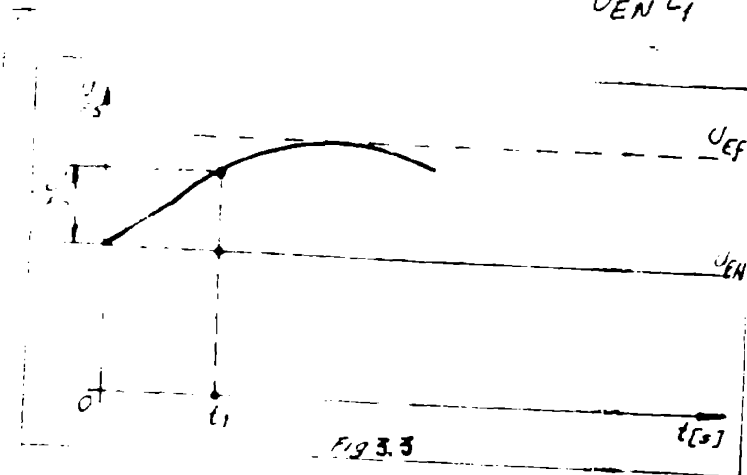
$$U(t) = U_{EN} + (U_{EF} - U_{EN}) \left(1 - R^{-\frac{t}{T_{ESE}}} \right) \quad (77)$$

Pentru determinarea vitezei de excitație se determină în prealabil timpul " t_1 ", în care se stinge tensiunea U' , ca în figura 3.3 (B 64):

$$U' = U_{EN} + 0,632 (U_{EF} - U_{EN}) \quad (78)$$

apoi viteza de excitație se exprimă:

$$V_{ex} = \frac{0,632 (U_{EF} - U_{EN})}{U_{EN} t_1} \quad (79)$$

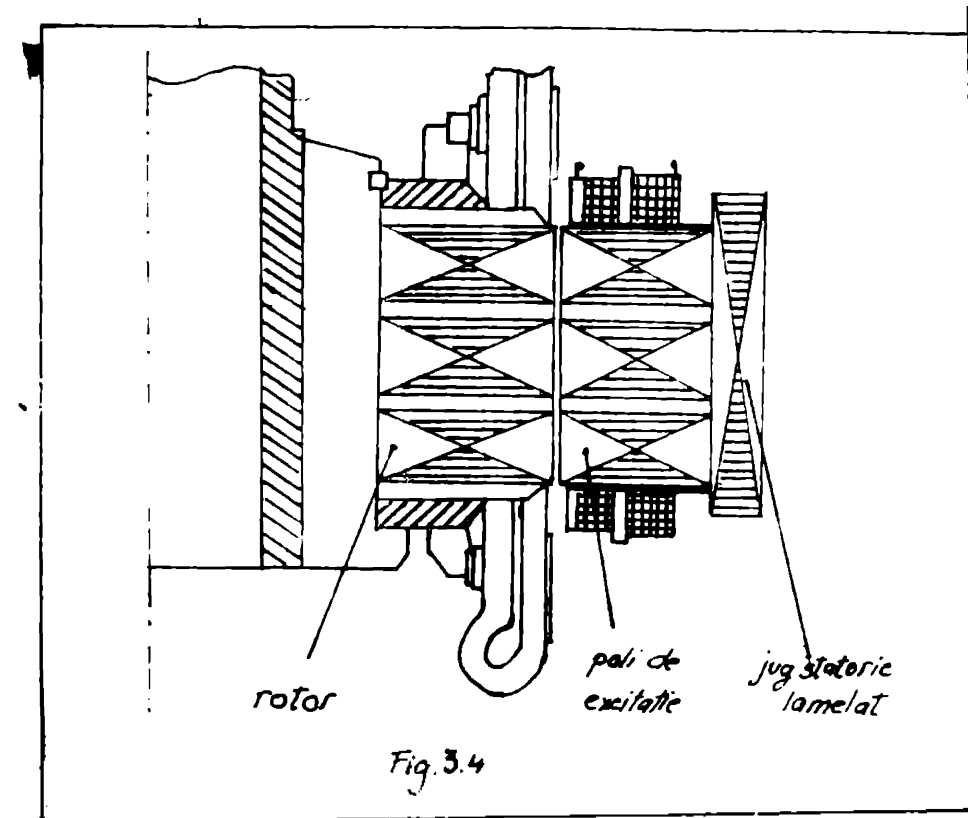


Pentru obținerea unei viteze de excitație cât mai corespunzătoare se pot adopta o serie de măsuri practice, privind dimensionarea excitatoarei, printre care subliniem în primul rând faptul că, excitatoarea

sincronă se construiește cu circuitul magnetic omogen, în întregime din tablă leneletă, renunțându-se la jugul stator turnet sau forjet (figura 3.4).

Din relațiile (76), (77), (79) se observă că, viteza de excitație a excitatoarei este cu atât mai mare cu cât este mai mare tensiunea plafon (de forțare) și cu cât este mai mică constanta de timp a excitatoarei.

Obținerea unei tensiuni de forțare cât mai ridicată presupune dimensionarea excitatoarei astfel încât, în regim nominal, punctul de funcționare să fie în zona nesaturată a caracteristicii de magnetizare. De aceea, inducțiile magnetice în diferite porțiuni ale circuitului magnetic cu în general valori mici, între 40-60% din valorile uzuale la o mașină sincronă.



Constanta de timp a excitatoarei (B 71) așe cum rezultă din expresia:

$$T_{ESE} = \frac{S_{ES} K_x}{2Bf(K_d - X_d) P_{e0}} \quad (80)$$

unde: $K_x \approx 1 \dots 4$ S_{ES} - puterea sperentă a excitatoarei poate fi micșorată, prin mărirea frecvenței "f" și micșorarea puterii de excitație la mers în gol a excitatoarei "P_{e0}". Dar, pe de altă parte, puterea de excitație necesară obținerii tensiunii nominale la mers în gol crește cu numărul de poli, deci cu frecvența mașinii. Curbele din figura 3.5 (B57), arată variația acestei puteri în funcție de frecvență. Se constată că, reducerea întrefierului și creșterea inducției din întrefier spre valoarea optimă se obține pentru frecvențe nu prea înalte.

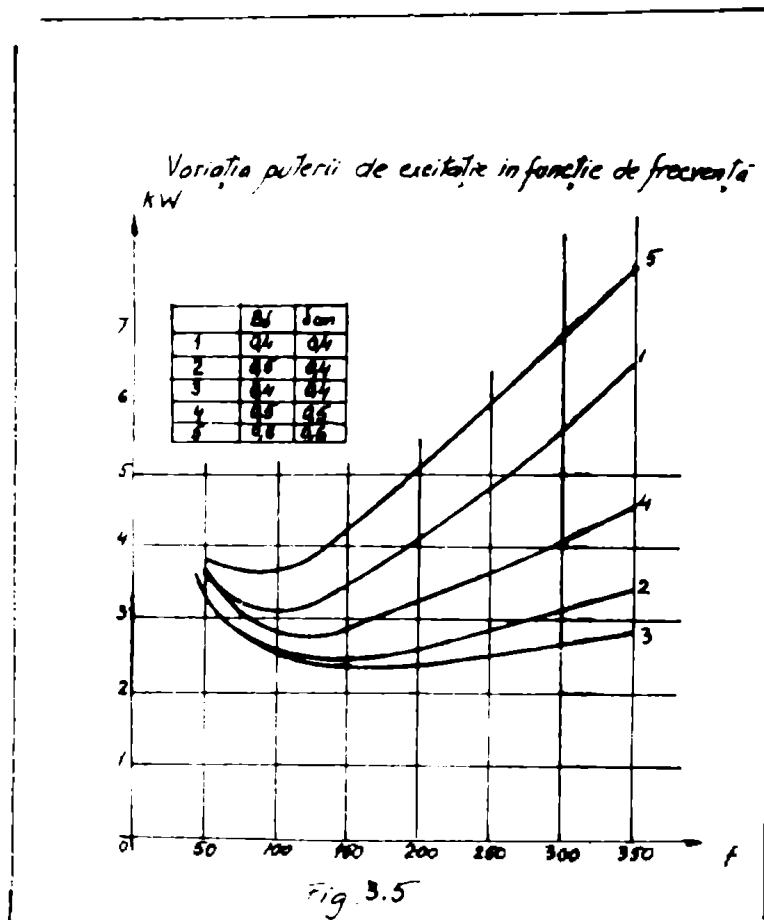
O dependență mai completă a elementelor de care depinde constanta de timp a excitatoarei la mers în gol (B 57) se observă din formula:

$$T_{ESE_0} = c f(m) \left(\frac{E_c}{c_1}\right)^2 \frac{\alpha_i B \delta \cdot \delta}{A \cdot K_w \cdot V_p} \cdot \frac{P_{n0}}{P_{e0}} \quad (81)$$

în care intervine: α_i - raportul dintre axul polar și pasul polilor;

B - amplitudinea inducției din întrefier;

δ - întrefierul;



P_{no} - puterea din indus (dată de redresorul rotativ)
 P_{eo} - puterea de excitație, λ - solenștia specifică, V_p - viteză periferică, K_w - coeficient de bobinaj al indusului, ϵ - raportul dintre solenștia totală și solenștia din întrefier, C_1 - coeficient de formă pentru o repartiție rectangulară a inducției, C - constantă depinzând de unitatea aleasă, $f(m)$ - funcție dependentă de numărul de faze și de

modul de redresare care este: $f(m) = \frac{60}{\pi \sqrt{2} m \sin \frac{\pi}{m}}$ pentru montajul în stea cu dublă redresare și: $f(m) = \frac{60}{2\pi} = 9,55$ pentru montajul în poligon (B 57).

Relația (81) arată influența parametrilor constructivi ai excitatoarei și anume: solenștia specifică λ_1 , inducția B , viteză periferică V și întrefierul δ :

Din analiza unor variante realizate (B 57) s-a observat (figura 3.6) că, pentru o anumită frecvență a tensiunii induse adoptate, variind inducția din întrefier, viteză de excitație prezintă un optim în vecinătatea valorii de 0,6 T.

În plus puterea de excitație crește odată cu mărirea sollicitărilor magnetice, astfel că, nu există nici un motiv pentru mărirea inducției din întrefier nominală peste această valoare optimă. Aceste considerații sînt valabile pentru toate frecvențele. Pentru o inducție apropiată de valoare optimă se poate observa cum variază viteza de excitație, menținînd constantă puterea de excitație necesară pentru a obține tensiunea plasă și curentul nominal. Din tabelul II se observă că este avantajos să se mări în anumite limite frecvența tensiunii in-

duse și de a micșora interfașul excitatoarei.

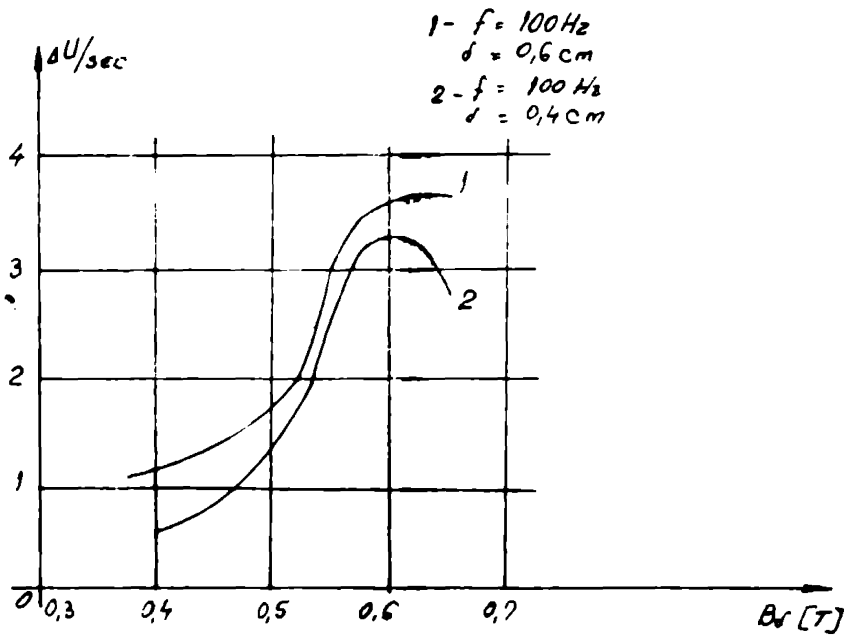


Fig. 3.6 Variația vitezei de excitație în funcție de inducție

Tabel 7

f	Bd T	d cm	P_{ef} W	V_{ex} $u.f./\text{sec}$
50 Hz	0,65	0,6	4500	0,9
100 Hz	0,62	0,6	4500	1,9
150 Hz	0,6	0,4	4500	3,7
200 Hz	0,65	0,4	4500	4,7

De asemenea, din analiza unor rezultate experimentale ($B \propto C$) se constată că, desfășurarea procesului de forțare a excitației se poate împărți în două etape. În prima etapă, tensiunea redresată a excitatoarei crește până la stingerea tensiunii de forțare, durata acestei etape fiind determinată de mărimea constantei de timp a excitatoarei, iar durata celei de a doua etape, în care are loc procesul de creștere al curentului

de excitație, este substanțial mai mare, fiindcă este determinată de constante de timp a generatorului principal, care este mai mare decât constante de timp a excitatoarei.

Se remarcă și o dependență a tensiunii maxime a excitatoarei de regimul de lucru anterior procesului de forțare, care condiționează corespunzător și viteza de excitație, ce va fi cu atât mai mare cu cât curentul de excitație dat de excitatoare este mai mic.

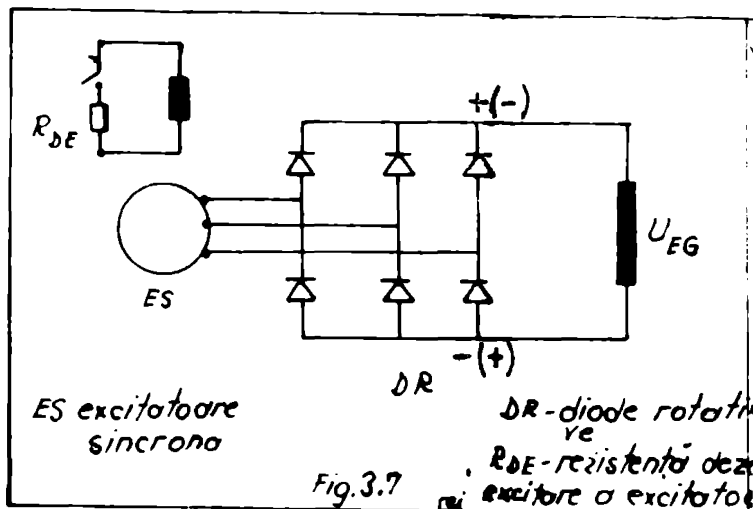
Variația tensiunii redresate a excitatoarei $U_{INC} = f(t)$ exprimată de relație (77) depinde de constante de timp a excitatoarei, care la rândul său trebuie diminuată cu un factor de proporționalitate (în medie 0,5; -0,7) (B 70), care depinde de regimul de lucru al generatorului principal.

Dacă acțiunea de forțare a excitatoarei se produce concomitent cu procesul transitoriu de scurtcircuit trifazat de lungă durată, la generatorul principal apar curenți liberi în rotorul mașinii principale, a căror mărime se determină în funcție de durata scurtcircuitelor. Datorită scăderii de tensiune în rezistențe de contacte, tensiunea excitatoarei scade, iar după câteva perioade ea se restabilește apoi crește sub acțiunea forțării excitatiei. În acest caz tensiunea plafon a excitatoarei se restabilește după stenuarea tuturor curenților liberi. Durata scăderii tensiunii excitatoarei și desfășurarea procesului în continuare depind de constante de timp a excitatoarei și de durata scurtcircuitului, deci se impune scăderea cât mai mult posibil a constantei de timp a excitatoarei. Această constantă de timp are influență și asupra domeniului de stabilitate a generatorului sincron principal, care scade odată cu creșterea constantei de timp a excitatoarei. Pentru buna funcționare a regulatorului automat de tensiune se necesită menținerea constantei de timp a excitatoarei sub o anumită valoare (< 1 sec). O creștere a constantei de timp a excitatoarei provoacă totodată o creștere a duratei oscilațiilor de după averii.

În concluzie, pentru ca viteza de excitație a excitatoarei să fie cât mai favorabilă, la o frecvență a tensiunii electromotoare indusă adoptată, o inducție în întrefier și un întrefier ales, se poate dimensiona înfășurarea inductoare optină a excitatoarei avind constante de timp cea mai mică.

3.5. Studiul posibilităților deexcitării rapide în caz de avarie

O problemă deosebită a funcționării în regiă transientă și la sistemul de excitație cu excitație sincronă și redresor rotativ, e constituia deexcitării în caz de avarie, respectiv la deconectarea bruscă a sarcinii și la oprirea agregatului.



Considerăm un generator sincron funcționând la sarcină nominală, turația și frecvența fiind cele nominale. În momentul când sarcina dispare brusc, turația crește, regulatorul de

turație limitând această creștere (la hidrogenatoare de obicei $120\% n_n$), totodată sistemul de comandă autoastă a grupului, comandă deconectarea bruscă a excitației generatorului, moment în care începe procesul transient de deexcitare.

Când se deconectează excitația grupului, la generatoarele cu sistem de excitație clasică sau statică, existența colectorului la excitație de curent continuu, respectiv a inelului la sistemul de excitație static, permite conectarea rapidă a bobinajului rotoric al generatorului principal pe o rezistență de deexcitare, prin intermediul căreia se limitează vârfurile de tensiune ce apar în primul moment, vârf ce poate pericula înalta acestui bobinaj.

Această se observă și din figura 3.7, la sistemul de excitație cu diode rotative, dispune orice posibilitate de conectare a unei rezistențe în circuitul de excitație al generatorului sau de creare a unei tensiuni de sens contrar. Din această cauză, procesul de deexcitare se desfășoară mai încet decât atunci când se utilizează una din metodele de deexcitare aplicabile la sistemul de excitație clasic sau static.

În procesul de dezexcitare apar virfuri de tensiune și de curent, deoarece cimpurile magnetice din rotor și stator nu dispar imediat ci se amortisează cu constantele de timp ale înfășurărilor respective.

Prezența acestor fluxuri deosebite induce tensiuni alternative în înfășurarea rotorică a generatorului principal, a căror amplitudine depinde de turația agregatului și de parametrii înfășurării rotorice a generatorului principal. Tensiunea alternativă ce se induce în înfășurarea de excitație U_{LEG} este aplicată în sensul de conducție pe diodele redresorului rotativ, pentru o polaritate și este blocată de aceeași diodă pentru cealaltă polaritate, așa cum se reprezintă în figura 3.7. Ambele situații solicită redresorul și înfășurarea de excitație a generatorului; în cazul scurtcircuitării prin înfășurare și diode va circula un curent de valoare mare, iar în cazul blocării pe redresor și pe înfășurare va apare un virf de tensiune mare. Virful de curent prin forțe electrodinamice produse nu trebuie să ducă la deteriorarea bobinajului de excitație, iar virful de tensiune să nu fie mai mare decât tensiunea de străpungere a izolației bobinajului de excitație. Totodată diodele redresoare trebuie să reziste la solicitările din acest regim.

Vom analiza procesul de dezexcitare și excitatoarei conectată la înfășurarea rotorică a generatorului principal cu sistemul de ecuații (71) în următoarele ipoteze:

- neglijăm influența cimpurilor magnetice din generatorul principal;
- excitatoarea funcționează la parametri nominali cunoscuți;
- în momentul încetării procesului de dezexcitare, ($t=t_0$), tensiunea de excitație a excitatoarei devine $U_{\text{FEE}}=U$, iar curentul de excitație I_{LEG} se închide într-un circuit de excitație cu rezistențe " $R_{\text{FEE}} + R_{\text{LE}}$ ", adică suma rezistenței înfășurării de excitație și a rezistenței de dezexcitație rapidă a excitatoarei;
- considerăm de asemenea aceeași ipoteză referitoare la componentele homopolare și regimul de funcționare al excitatoarei ca la forțarea excitației.

În acest caz din relațiile (47,69,70) se obține:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \omega x_2 I_2 - p I_{\text{ESE}} & I_{\text{ESE}} &= \frac{I_{\text{EN}}}{p + \frac{1}{T_{\text{DE}}}} \\
 U_2 &= -(r_2 + p x_2) - \omega I_{\text{ESE}} & U_2 &= K_{\text{LEG}} I_2
 \end{aligned}
 \tag{82}$$

unde $L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$

T_{ED} - constante de timp corespunzătoare circuitului de excitație a excitatoarei cu " $R_{EK} + R_{KE}$ "

Din (82) se determină curentul din inductorul excitatoarei în timpul demeritării:

$$i_g = \frac{-\omega I_{ESE}}{x_2 \left(p + \frac{r_2 + K I_{EG}}{x_2} \right) \left(p + \frac{1}{T_{ED}} \right)}$$

Folosind aceeași notație (73):

$$\lambda = \frac{r_2 + K I_{EG}}{x_2} \quad (\beta = \frac{K I_{EG} \omega}{x_2})$$

Originalul funcției $i_g(p)$ se determină pornind de la relația:

$$\frac{1}{(p+\lambda)\left(p+\frac{1}{T_{ED}}\right)} = \frac{A}{p+\lambda} + \frac{B}{p+\frac{1}{T_{ED}}} = \frac{(A+B)p + \frac{A}{T_{ED}} + B\lambda}{(p+\lambda)\left(p+\frac{1}{T_{ED}}\right)}$$

Prin identificare:

$$A = \frac{1}{\frac{1}{T_{ED}} - \lambda} \quad B = \frac{1}{\lambda - \frac{1}{T_{ED}}}$$

$$\mathcal{L}^{-1} i_g(p) = \frac{\omega I_{ESE} T_{ED}}{x_2 (1 - \lambda T_{ED})} \left(e^{-\lambda t} - e^{-\frac{t}{T_{ED}}} \right)$$

$$i(t) = I_{EN} - j \frac{\omega I_{ESE} T_{ED}}{x_2 (1 - \lambda T_{ED})} \left(e^{-\lambda t} - e^{-\frac{t}{T_{ED}}} \right) \quad (83)$$

În (83) primul termen reprezintă curentul din inductorul excitatoarei în momentul începerii procesului de demeritare, iar al doilea variația curentului pe impedința de sarcină a excitatoarei.

Calculăm " U_g ", " U_d " din (82)

$$U_g = - \frac{\omega K I_{EG}}{r_2 + K I_{EG} + p x_2} I_{ESE} = - \frac{\beta I_{ESE}}{(p+\lambda)\left(p+\frac{1}{T_{ED}}\right)}$$

Determinăm originalul funcției:

$$\mathcal{L}^{-1} |U_g(p)| = \frac{\beta I_{ESE} T_{DE}}{1 - \lambda T_{DE}} \left(e^{-\lambda t} - e^{-\frac{t}{T_{DE}}} \right)$$

$$\mathcal{L}^{-1} |U_d(p)| = \frac{p^2 + p\lambda + \omega^2}{(p+\lambda)\left(p+\frac{1}{T_{DE}}\right)} I_{ESE}$$

avind în vedere condițiile limită:

$$t=0 \quad ; \quad U_d(t) = 0$$

$$U_d(t) = I_{ESE} \left[\gamma'(t) - \frac{1}{1-\lambda T_{ED}} \left[\left(\frac{1}{T_{ED}} - \lambda + \omega^2 T_{ED} \right) R e^{-\frac{t}{T_{ED}}} - \omega^2 T_{ED} e^{-\lambda t} \right] \right]$$

$$\gamma'(t) = \frac{1}{T_{ED}}$$

$$U_d(t) = \frac{I_{ESE}}{T_{ED}} - \frac{I_{ESE}}{1-\lambda T_{ED}} \left[\left(\frac{1}{T_{ED}} - \lambda + \omega^2 T_{ED} \right) R e^{-\frac{t}{T_{ED}}} - \omega^2 T_{ED} R e^{-\lambda t} \right]$$

$$U(t) = U_{EN} - \left\{ \frac{I_{ESE}}{T_{ED}} \left[1 - R e^{-\frac{t}{T_{ED}}} - \frac{\omega^2 T_{ED}^2}{1-\lambda T_{ED}} \left(R e^{-\frac{t}{T_{ED}}} - e^{-\lambda t} \right) \right] + j \frac{15 I_{ESE} T_{DE}}{1-\lambda T_{ED}} \left(e^{-\lambda t} - e^{-\frac{t}{T_{ED}}} \right) \right\} \quad (84)$$

Variția tensiunii excitatoarei obține o formă simplificată, dacă în relație de mai sus se admite cu aproximație $\lambda \approx \frac{1}{T_{ED}}$ și anume:

$$U(t) = U_{EN} - U_{EN} \left(1 - R e^{-\frac{t}{T_{ED}}} \right) = U_{EN} R e^{-\frac{t}{T_{ED}}} \quad (85)$$

Mășorarea constantei de timp a excitatoarei determină stingerea mai rapidă a tensiunii excitatoarei la demarșare rapidă și deși aceleași măsuri practice enunțate pentru mărirea vitezei de excitație sînt favorabile și pentru demarșarea rapidă a excitatoarei. Totodată alegerea potrivită a rezistenței de demarșare a excitatoarei, avind în vedere de aproximativ 10 ori valoarea rezistenței bobinejului de excitație a excitatoarei determină mășorarea constantei de timp a excitatoarei și deci a timpului de demarșare a excitatoarei.

Analiza experimentală prin oscillografierea stingerii directe a cîmpului generatorului principal (B 73) a arătat că, acest proces are loc de aproximativ 2,5 ori mai încoace la excitația sincronă cu diode rotative, decât în cazul sistemelor de excitație care oferă posibilitatea intercalării directe a rezistenței de demarșare în rotorul generatorului principal.

Imposibilitatea de a interveni direct în circuitul rotoric al generatorului la acest sistem de excitație, pentru a realiza o demarșare rapidă, constituie principelul neajuns al sistemului, dar pentru a vedea importanța demarșării vom analiza efectele ce se produc în caz de evarie, cu și fără instalație de demarșare rapidă.

Pentru aprecierea energiei care apare în zona defectă a înfășurării statorice în cazul unei evarii (scurtcircuit), trebuie avut în vedere, că, procesul de demarșare, poate începe abia cînd întrerupătorul a deconectat mașina de la rețea. Dacă

puterea consumată la scurtcircuit este alimentată, așa cum se întâmplă de cele mai multe ori, de la rețea, atunci cea mai mare parte a energiei de avarie se consumă la locul avariei. Trebuie sărătit că, nici cea mai rapidă instalație de dezexcitare, nu are o influență deosebită asupra componentei continue (aperiodice) a curentului de scurtcircuit. Tot atât de puțin poate fi influențat câmpul în axa transversală a generatorului, prin excitarea în sens invers. În funcție de puterea de scurtcircuit a mașinii afectate, poate fi anihilată, la o apreciere prudentă, aprox. 30% din energia de la locul avariei, prin cea mai rapidă dezexcitație. La un scurtcircuit bipolar, nici cea mai rapidă instalație de dezexcitare nu poate evita avaria statorică și o perioadă mai mare de timp pentru reparație. Exemplele din parotică confirmă cele de mai sus (B 1).

În cazul unor scurtcircuite monopolare la pământ, așa cum a rezultat din încercări, curenții de scurtcircuit la generatoarele de putere mare, pot produce defecte care sînt reparabile prin intervenții de scurtă durată și în acest caz nu sînt necesare instalații rapide de dezexcitare.

În cazuri speciale cînd se necesită reglajul deosebit de rapid al tensiunii se pot folosi punți duble cu tiristori, cu care se obțin efecte de excitare în sens invers, dar se pune întrebarea dacă problema care apare legată de folosirea unui număr dublu de elemente semiconductoră și a dispozitivului de transmitere al impulsurilor de comandă pentru cele două punți cu tiristoare este justificat.

În concluzie la generatoarele sincrone prevăzute cu excitatoare sincrone cu diode rotative procesul de dezexcitare al generatorului se realizează prin conectarea unei rezistențe de dezexcitare în circuitul de excitație al excitatoarei. Dimensiunile potrivite a acestei rezistențe de dezexcitare oferă posibilitatea reducerii timpului de dezexcitare al excitatoarei sincrone cu diode rotative. Procesul de stingere al câmpului generatorului principal are loc însă mai încet în cazul generatoarelor prevăzute cu sistemul de excitație cu excitatoare sincrone cu diode rotative, decât în cazul sistemelor de excitație care oferă posibilitatea micșurării constantei de timp a încălzirii de excitație a generatorului principal prin intercalarea directă a unor rezistențe de dezexcitare, acest fapt constituind un necaj al acestui sistem de excitație.

Capitolul IV

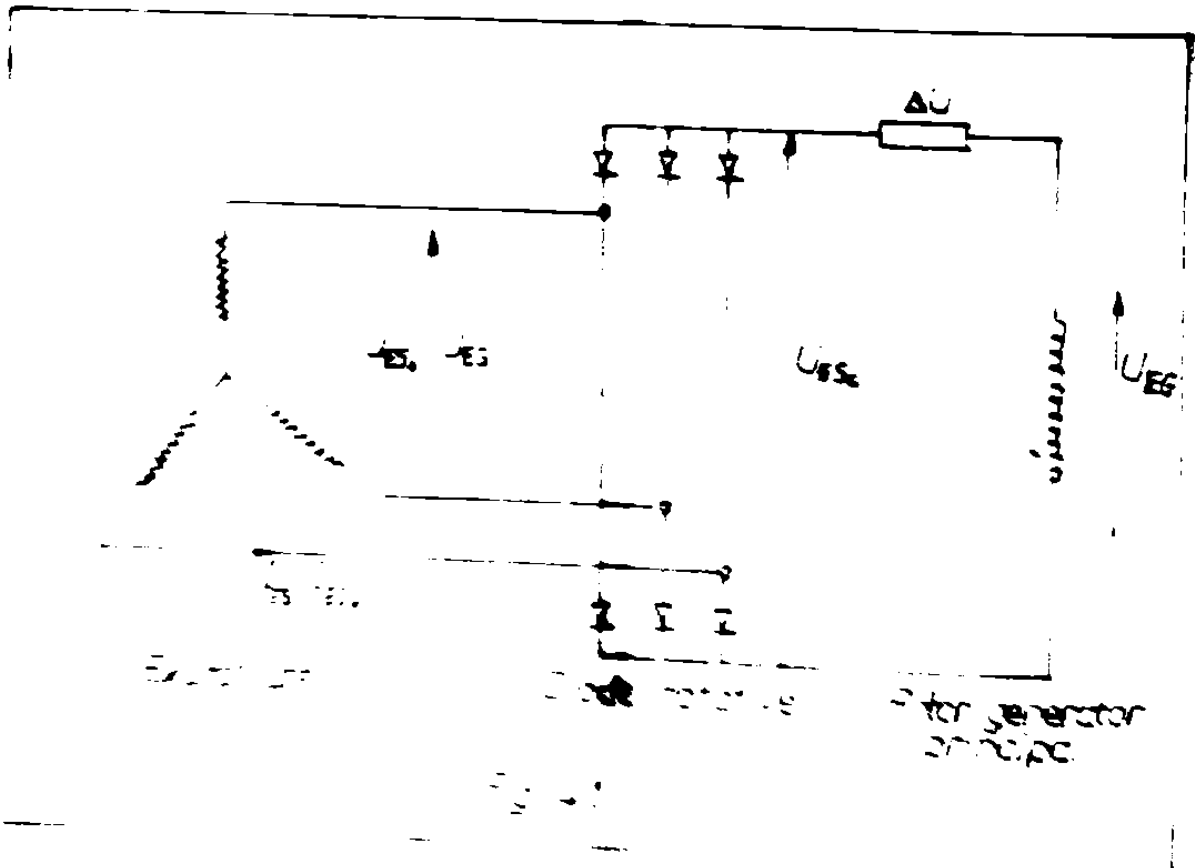
PROIECTAREA OPTIMĂ A REACTANȚII SISTEMULUI CU DIODE ROTATIVE

4.1. Stabilirea elementelor principale de care depinde de caracteristicile caracteristice ale sistemului de excitație și a caracteristicilor caracteristice

Excitația sistemului cu diode rotative, prin caracteristicile sale, face ca funcționarea ei, să depindă de datele excităției magnetice principale și de redresarea cu diode rotative pe care îl alimentează.

Pentru ca excitația să corespundă cerințelor și să fie caracteristică comună este necesar să se cunoască datele caracteristice ale magnetului: tensiune, curent, factor de putere, precum și factorul de fază și viteza de excitație minimă necesară.

În vederea precizării datelor principale ale excităției sistemului este necesar, să se verifice dacă datele ei în curent alternativ, corespund cu datele bobinajului de excitație ale magnetului principal.



Correspondența detaliilor de excitație din curent continuu și modului de cuplare; adoptat (în "stea" cu "punte trifazată cu dublă redresare" sau în "poligon") sînt hotărîtoare următoarele date ale excitatoarei sincrone:

- fundamentala tensiunii la borne a excitatoarei și valoarea efectivă: U_{ES}, U_{ES}
- fundamentala curentului și valoarea sa efectivă I_{ES1}, I_{ES}
- turajul nominal și de sablare a mașinii: n, n_p
- factorul de putere pentru fundamentală și aparent: $\cos \varphi, \cos \varphi$
- tensiunea plafon de excitație respectiv factorul de forțare U_{EG}, K_p
- viteză de excitație a excitatoarei: v_{ex}

Stabilirea expresiilor pentru tensiunea, curentul și factorul de putere al excitatoarei sincrone cu diode rotative se va face în cazul general, respectiv în ipoteza curentului continuu "neted".

Formulele utilizate sînt deduse în următoarele ipoteze:

- a) - excitația sincronă și redresorul său sînt fără pierderi;
- b) - tensiunea internă (t.e.m.) a excitatoarei sincrone este constantă și de formă sinusoidală;
- c) - constanta de timp a circuitului de excitație a mașinii principale este infinit de mare.

Acste ipoteze determină următoarele (B 37):

- în timpul comutării, tensiunea de linie a fazelor respective este egală cu zero;
- componenta de trecere a curentului de comutare este nesemnificativă;
- componenta alternativă a curentului de comutare este un curent pur reactiv;
- inductanța induce numai fundamentele și aceste pot fi la rîndul ei transmise cîmpului numai putere activă;
- armenile de curent, care produc într-o mașină fără pierderi, variații de flux, ce induce tensiuni defazate cu 90° și din această cauză nu produc nici o putere activă.

În aceste condiții este valabilă relația pentru puterea de excitație la inelele redresorului rotativ

$$P_{ESc} = I_{ESc} \cdot U_{ESc} = m U_{ES} I_{ES} \quad (86)$$

Fără prima ipoteză, (adică curentul continuu neted), armenile de curent ar fi cauzat pierderi în excitația sincronă și

corespunzător o putere mai mică: $P_{G1} = P_{ESc} - \sum_{j=1}^{\infty} P_j$ (87)

Puterea la ieșirea redresorului va fi (figura 4.1) mai mică cu pierderile în redresor "ΔP".

$$P_{ESc} = P_{G1} - \Delta P = U_{ESc} I_{ESc} \quad (88)$$

Pentru un curent de excitație I_{EN} și rezistențe înfășurării de excitație R_{EG} , precizată la temperatura de funcționare a generatorului principal, se calculează tensiunea de excitație nominală U_{EN} a acestuia, ea fiind produsul lor. Tensiunea continuă U_{ESc} a redresorului este mai mare decât tensiunea de excitație U_{EN} a generatorului principal și anume cu ΔU:

$$U_{ESc} = U_{EN} + \Delta U \quad (89)$$

Căderea de tensiune "ΔU" este produsă în conductoarele de legătură dintre redresorul rotativ cu diode și înfășurarea de excitație a generatorului. Pentru calculele următoare vom defini o tensiune " U_{UG} " mai mare cu căderea de tensiune în redresor. Rezistențe de comutație pe fază se calculează (în ipotezele enunțate) din rezistențe supraconductoare sau tranzitorie și rezistențe inverse a excitatoarei (x_1 sau x'_1 , x_2) (relațiile 54, 55)

$$x_c = \frac{x'_1 + x_2}{2} \quad (90)$$

Rezistența întregului circuit de curent continuu este:

$$R_{EG} = \frac{U_{EN}}{I_{EN}} \quad (91)$$

Calculul cîrmărilor în curent alternativ este funcție de felul punții redresare, relațiile de mai jos fiind valabile pentru o comutare simplă, care reprezintă un scurtcircuit monophasat și unul bifazic.

Formulele principale care exprimă tensiunile curenții și factorul de putere al excitatoarei, ținînd cont de procesul de comutare, sînt prezentate în mod sintetic pentru cele două cazuri de bază enunțate și anume:

I. Cazul excitatoarei cu redresor cu comutație paralel dublă (punte trifazată):

- tensiunea alternativă a excitatoarei, valoarea efectivă și valoarea fundamentalei (B 56):

$$U_{ES} = \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{2}} \frac{2}{1 + \cos\alpha} \sqrt{1 + \frac{3}{4\alpha} (\sin 2\alpha - 2\alpha)} U_{ESc} \quad (92)$$

$$U_{ESf} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{1 + \frac{3}{2\pi} (\sin 2\alpha - 2\alpha) + \frac{9}{16\pi^2} (\sin 2\alpha - 2\alpha)^2 + \frac{9}{4\pi^2} \sin^4 \alpha}{1 + \cos\alpha}} U_{ESc} \quad (93)$$

unde splitezarea datorită comutației se exprimă cu relația

$$(B 57): \quad \cos \alpha = \frac{\frac{\pi}{3} - \frac{X_c}{R E_{sc}}}{\frac{\pi}{3} + \frac{X_c}{R E_{sc}}} \quad (94)$$

- curentul alternativ al excitatoarei, valoarea efectivă și valoarea fundamentală:

$$I_{ES} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{\alpha}{\pi} \frac{1 + 2 \cos \alpha}{(1 - \cos \alpha)^2} - \frac{\sin 2\alpha + 4 \sin \alpha}{2\pi (1 - \cos \alpha)^2}} I_{E_{sc}} \quad (95)$$

$$I_{ES1} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi} \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + (\sin \alpha \cos \alpha - \alpha)^2}}{1 - \cos \alpha} I_{E_{sc}} \quad (96)$$

În cazul idealizat, al curentului continuu neted se impune condiția ca $\alpha \rightarrow 0$ și se obțin expresiile tensiunii și curentului alternativ al excitatoarei (cap. II - relațiile 12-17).

Ținând cont de relațiile de mai sus se exprimă puterea aparentă a excitatoarei, astfel:

$$S_{ES1} = \sqrt{3} U_{ES1L} \cdot I_{ES1L} = U_{ES} \cdot I_{ES} \quad (97)$$

$$S_{ES} = \sqrt{3} U_{ESL} \cdot I_{ESL} = \frac{\pi}{3} U_{E_{sc}} I_{E_{sc}} \quad (98)$$

Puterea activă a excitatoarei se exprimă de asemenea în funcție de valorile fundamentale, cele efective și redresate ale curenților și tensiunilor:

$$P_{ES1} = \sqrt{3} U_{ES1L} \cdot I_{ES1L} = U_{E_{sc}} \cdot I_{E_{sc}} \quad (99)$$

$$P_{ES} = \sqrt{3} U_{ESL} \cdot I_{ESL} \cos \varphi = U_{E_{sc}} \cdot I_{E_{sc}} \quad (100)$$

Din relațiile (98) și (100) rezultă, că factorul de putere aparent al excitatoarei trifazate cu redresor cu comutație paralelă dublă este $\cos \varphi = \frac{3}{\pi} = 0,9549$, iar pentru fundamentală este $\cos \varphi = 1$.

II. Cazul excitatoarei cu redresor cu comutație serie (punte poligonală cu un număr de faze per și imper):

- tensiunea alternativă, valoarea efectivă (B 57):

$$U_{ES} = \frac{\pi}{\sqrt{2} m} \cos^2 \frac{\alpha}{2} U_{E_{sc}} \quad (101)$$

- curentul alternativ valoarea efectivă pe fază:

$$I_{ES} = \frac{I_{E_{sc}}}{2} \sqrt{1 - \psi_1(\alpha)} \quad (102) \text{ pentru cazul cu } m\text{-per}$$

$$I_{ES} = \frac{I_{E_{sc}}}{2} \sqrt{1 - \frac{1}{m^2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{m+3}{m+1} \psi_1(\alpha)} \quad (103) \text{ pentru cazul cu } m\text{-imper}$$

unde $\psi_1(\alpha) = \frac{(2 + \cos \alpha) [\sin \alpha - (1 + 2 \cos \alpha) \alpha]}{2\pi (1 - \cos \alpha)^2} = \dots \frac{2\alpha}{15\pi} (1 + \frac{\alpha^2}{84} + \dots) \quad (104)$

În cazul idealizat ($\alpha \rightarrow 0$) se obțin expresiile tensiunilor și curentului excitatoarei (cap. III - relațiile 19, 29, 30).

Puterea activă a excitatoarei m -fazate cu conexiunea poligonală a fazelor se exprimă în funcție de valorile efective și

TABEL III

Unghiul de comutație în funcție de numărul de faze ales pentru diferite valori ale reactanțelor de comutație și diverse tipuri de redresare adaptate.

	Cuplaj	m										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x = 0,05	stea SR	18,32	21,95	26,38	31,02	36,80	40,80	46,13	51,89	58,55	$> \frac{4\sqrt{3}}{m}$	-
	stea DR	15,37	18,39	22,05	26,85	29,71	33,68	37,81	42,88	46,93	52,13	57,84
	poligon	21,77	22,48	21,77	22,02	21,77	21,90	21,77	$> \frac{\sqrt{3}}{m}$	21,77	-	21,77
x = 0,10	stea SR	26,10	31,42	38,04	45,17	52,89	61,58	71,82	$> \frac{4\sqrt{3}}{m}$	-	-	-
	stea DR	21,86	26,24	31,63	37,34	43,35	49,80	56,98	65,25	$> \frac{4\sqrt{3}}{m}$	-	-
	poligon	31,03	32,09	31,03	31,42	31,03	$> \frac{\sqrt{3}}{m}$	31,03	-	31,03	-	-
x = 0,15	stea SR	32,19	38,92	47,45	56,87	67,91	81,41	$> \frac{4\sqrt{3}}{m}$	-	-	-	-
	stea DR	26,91	32,41	39,26	46,68	54,77	63,97	74,93	$> \frac{4\sqrt{3}}{m}$	-	-	-
	poligon	38,30	39,66	38,30	$> \frac{\sqrt{3}}{m}$	38,30	-	38,30	-	38,30	-	38,30
x = 0,20	stea SR	37,42	46,45	55,83	65,88	82,84	$> \frac{4\sqrt{3}}{m}$	-	-	-	-	-
	stea DR	31,22	37,72	45,93	55,03	65,27	77,93	$> \frac{4\sqrt{3}}{m}$	-	-	-	-
	poligon	44,57	46,22	44,57	$> \frac{\sqrt{3}}{m}$	44,57	-	44,57	-	44,57	-	44,57

TABEL IV

Factorul de putere aparent al excitatoarei în funcție de numărul de faze pentru diferite reactanțe de comutație și diferite conexiuni de redresare.

	Cuplaj	m										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x = 0	stea SR	0,637	0,675	0,637	0,592	0,551	0,517	0,487	0,462	0,440	0,421	0,404
	stea DR	0,300	0,355	0,300	0,337	0,380	0,431	0,489	0,553	0,622	0,595	0,571
	poligon	0,900	0,955	0,900	0,819	0,900	0,910	0,900	0,906	0,900	0,904	0,900
x = 0,05	stea SR	0,629	0,667	0,629	0,584	0,545	0,512	0,485	0,462	0,442	-	-
	stea DR	0,894	0,950	0,897	0,836	0,782	0,737	0,701	0,672	0,649	0,630	0,611
	poligon	0,875	0,930	0,875	0,895	0,875	0,886	0,875	-	0,875	-	0,875
x = 0,10	stea SR	0,616	0,649	0,604	0,553	0,506	0,464	0,421	-	-	-	-
	stea DR	0,882	0,933	0,876	0,809	0,750	0,699	0,655	0,614	-	-	-
	poligon	0,846	0,898	0,846	0,865	0,846	-	0,846	-	0,846	-	0,846
x = 0,15	stea SR	0,602	0,628	0,576	0,515	0,455	0,391	-	-	-	-	-
	stea DR	0,869	0,914	0,850	0,776	0,708	0,645	0,580	-	-	-	-
	poligon	0,815	0,864	0,815	-	0,815	-	0,815	-	0,815	-	0,815
x = 0,20	stea SR	0,588	0,606	0,545	0,472	0,392	-	-	-	-	-	-
	stea DR	0,855	0,894	0,828	0,739	0,638	0,573	-	-	-	-	-
	poligon	0,784	0,830	0,784	-	0,784	-	0,784	-	0,784	-	0,784

cele redresate ale tensiunilor și curenților astfel:

$$P_{ES} = m U_{ES} I_{ES} \cos \varphi = U_{ES2} \cdot I_{ES2} \quad (105)$$

Factorul de putere aparent al excitatoarei m-fazate în conexiune poligonală:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\pi} \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \quad (106)$$

Din relațiile de mai sus se pot calcula pentru tipul de conexiune adoptat (stea sau poligon) și în funcție de numărul de faze ale, unghiul de comutație și factorul de putere aparent al excitatoarei (B 57) reduse în tabelele III, IV.

Examinarea lor arată că, pentru reactanțe de comutație dată cea mai bine utilizată mașină se obține cu cuplajul trifazat în stea cu dublă redresare, iar valorile obținute în conexiunea poligon și comutație serie sînt foarte apropiate. De asemenea se observă că pentru conexiunea stea cu comutație paralel unghiul de comutație crește cu numărul de faze, iar factorul de putere aparent se diminuează iar la cuplajul poligon cu comutație serie aceste caracteristici sînt independente de numărul de faze dacă numărul de faze este par și variază foarte puțin dacă este impar. În concluzie se pot reține ca soluții constructive pentru excitatoarele sincrone cu diode rotative conexiunea trifazată în stea cu comutație paralelă dublă și conexiunea poligonală cu un număr impar de faze cu comutație serie.

În afară de relațiile stabilite trebuie avut în vedere ca o particularitate, faptul că în înfășurarea indusului excitatoarei sincrone cu diode rotative, din cauze armonicilor superioare din curbe curențului $I_{ES\lambda}(t)$, intervin pierderi suplimentare. Pentru realizarea unui randament corespunzător, ele trebuie reduse și în acest sens se folosește, în mod obligatoriu divizarea barei în conductori elementari și transpoziția acestora în partea frontală ca în figura 4.2 (B 57).

Cuicere ar fi modalitatea de redresare adoptată, curențul pe fază $I_{ES\lambda}(t)$ poate fi exprimat prin relația:

$$I_{ES\lambda} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} A_n \sqrt{2} \sin(m\omega t - \varphi_n) \quad (107)$$

în care A_n - reprezintă valoarea efectivă a armonicii de ordinul "n" și " ω " pulsația fundamentalei.

Fiecărei valori A_n îi corespunde pierderi normale și pierderi suplimentare a căror sumă pentru fiecare armonică dau pierderile totale. La curenți sinusoidali e obișnuit să se repartese pierderile totale la pierderi prin efect Joule normal, prin introducerea unui coeficient:

$$K_T = \frac{M + P_S}{M} \quad (108)$$

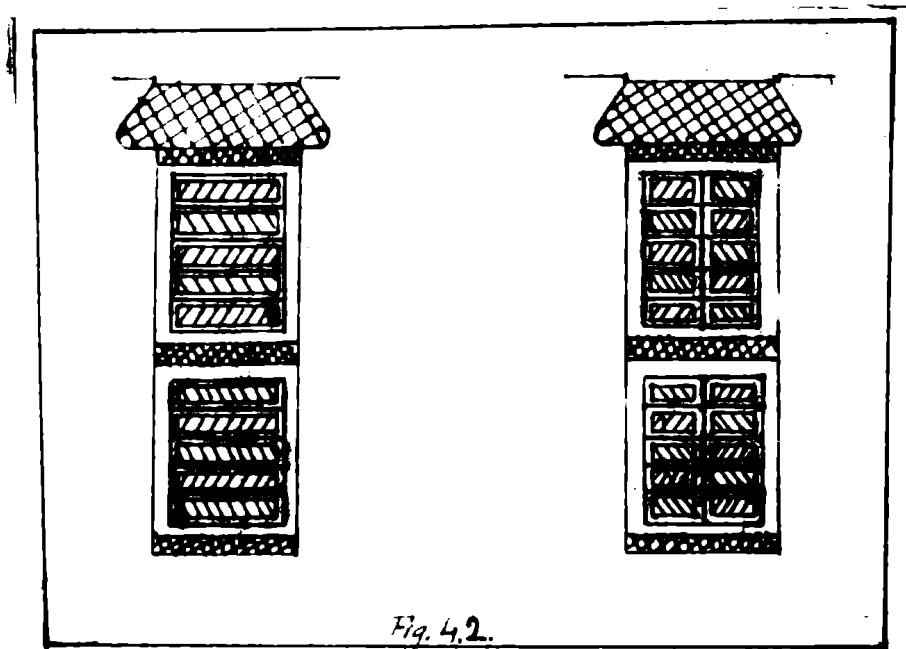


Fig. 4.2.

unde "J" reprezintă pierderile din efect Joule, iar P_g reprezintă pierderile suplimentare.

În curent redresat se poate introduce un coeficient similar, dar în care J și P_g reprezintă pierderile prin efect Joule suplimentare globale. Coeficientul K_J se determină cu relația:

$$K_J = \frac{\sum A_n^2 K_n}{I_{ES}^2} \quad I_{ES}^2 = \sum_{\lambda=1,3,5}^{\infty} A_n^2 \quad (109)$$

iar " K_n " reprezintă coeficientul de pierdere pentru armonia de ordinul " λ ", care depinde (B 57) de: geometria crestăturii, numărul de fire elementare pe bară, frecvența tensiunii induse și unghiul de conducție al diodelor.

Având datele inițiale determinate ale excitatoarei sincrone se știe că pentru un volum dat, puterea mașinii este proporțională cu solenșia specifică "A" și cu inducția medie "B". Plașa de modificare a acestor doi parametri este foarte îngustă, dar inducția medie poate fi crescută fără a modifica inducția maximă, mărină factorul de acoperire a tălpii polare:

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\delta} \quad (110)$$

Creșterea lui " α_i " strage scurțarea timpului de conducție al diodelor, deci creșterea curentului de vîrf și a curentului efectiv, dar și o sollicitare mai mare a diodelor din redresorul rotativ.

Volumul excitatoarei "D²L" (D-fiind diametrul exterior al inductorului, L-lungimea părții active) este determinat de o putere convențională produsă de curentul nominal și de plașonul de tensiune, astfel că circuitul magnetic al mașinii este mai larg dimensi-onat în regiunea nominal (corespunzător factorului de ferigare impus

prin datele nominale ale mașinii), valorile saturate ale inducțiilor stingându-se doar la forțare.

Frecvența tensiunii electromotoare induse prezintă o importanță deosebită prin influențe pe care o are asupra constantei de timp a excitației și implicit asupra proprietăților de reglaj ale mașinii.

Spore deosebire de generatoarele sincrone obișnuite la proiectarea excitatoarelor sincrone apar o serie de aspecte speciale referitoare la: asigurarea unui raport corespunzător între puterea de excitație maximă și nominală ($\frac{P_{ef}}{P_{oh}} \approx 3,5-4$), asigurarea plafonului tensiunii și în special al vitezei de excitație suficiente, pentru funcționarea sigură a generatoarelor sincrone în centralele electrice.

4.2. Alegerea criteriului de optimizare la proiectarea excitatoarei sincrone cu diode rotative. Aplicarea sa la calculul de dimensionare a înfășurării inductoare

La excitatoarele sincrone cu redresor rotativ cu diode se acordă prioritate optimizării parametrilor mașinii în regimul tranzitoriu cel mai important și anume la forțarea excitației (respectiv vitezei de excitație) și abia în al doilea rând se acordă importanță dimensiunilor circuitului electromagnetic al mașinii. Pe acest considerent drept criteriu de optimizare pentru calculul excitatoarei sincrone cu diode rotative se alege obținerea celei mai mari viteze de excitație, deci:

$$V_{ex} = V_{ex\ max}$$

(111)

Pentru a găsi o variantă optimă din punctul de vedere al vitezei de excitație, vom calcula în prealabil o mașină pornind de la datele inițiale, la care se adaugă mărimile geometrice de bază, elemente ale înfășurărilor din rotor și stator și calitatea tolelor. Viteza de excitație calculată pe baza relațiilor (77), (78), (79) se va optimiza prin dimensionarea excitatoarei, astfel ca să se obțină pentru ea cea mai mică constantă de timp, modificând într-un domeniu larg, dar posibil de executat (practic limitat la plaje de valori din datele inițiale, care să nu ducă la un număr exagerat de mare de iterații), înfășurarea inductoare a excitatoarei, respectiv numărul de spire și secțiunea lor. Această soluție are avantajul că, din punct de vedere matematic este mai simplă și permite folosirea metodei uzuale de proiectare; necesită însă dimensionarea

unei prime variante, bazată pe experiența unor mașini deja realizate.

Dimensionarea preliminară a excitatoarei se face în funcție de datele înfășurării de excitație ale generatorului sincron principal (putere, tensiune și curent de excitație) la care se adaugă cerințele impuse sistemului de excitație privind performanțele în regim tranzitoriu, în principal factorul de forțare al tensiunii, curentul de forțare și viteza de excitație.

Cunoscând tensiunea și curentul la bornele înfășurării de excitație a generatorului sincron principal la temperatură de funcționare a acestei înfășurări, se determină pe baza relațiilor (88), (89) tensiunea și puterea la inelele redresorului cu diode rotative.

În funcție de schema de redresare adoptată (trifazată cu comutație paralel dublă sau polifazată cu comutație serie), se determină mărimile nominale în curent alternativ ale excitatoarei (relațiile (92), (95), (98), (101), (102), (103), (104), (105) și se alege tipul de înfășurare al rotorului care satisface condițiile exprimate prin relațiile (4), (9) sau (10). Din tabelele III, IV se apreciază unghiul de comutație și factorul de putere aparent al excitatoarei în funcție de numărul de faze, modul lor de conexiune și reactanțe de comutație, apoi se alege frecvența tensiunii electromotoare induse (figura 3.5, tabelul II) și implicit numărul de poli al excitatoarei.

Inducția maximă în întrefier se adoptă în mod obișnuit sub $0,6 \text{ T}$ (figura 3.6), dar inducția medie poate fi mărită prin alegerea unui factor de acoperire a tălpii polare (relația 110) ceva mai mare ($\alpha_i \approx 0,75 - 0,82$) decât cel usual la generatoarele sincrone cu poli sprenți în rotor ($\alpha_i \approx 0,67 - 0,72$). În faza inițială se alege oțeva valori ale frecvenței tensiunii electromotoare induse (figura 3.5) pentru care se face o predimensionare a mașinii, astfel încât silitățile electromagnetice (inducție în întrefier și solenție specifică) să se înscrie în limitele recomandate. Dimensiunile geometrice alese se completează cu un calcul amănunțit al circuitului electromagnetic al excitatoarei, după care se determină caracteristicile de mers în gol și sarcină.

Pentru calculul vitezei de excitație (relația 79) se determină în prealabil curbe de variație în timp a tensiunii excitatoarei care alimentează bobinele rotorice al generatorului principal (relația 77).

Constante de timp a excitatoarei se exprimă cu parametrii excitatoarei, în care se evidențiază numărul de spire și secțiunea

lor, cu care s-ar putea executa bobinajul de excitație și excitației și care se introduc împreună cu datele inițiale în programul de calcul, astfel:

$$T_{ESE} = \frac{X_{ESE}}{\omega R_{ESE}} = \frac{X_{ad} + X_{ESES}}{\omega R_{ESE}} \quad (112)$$

În această relație (112) intervin următoarele elemente care se determină în continuare:

$$\omega = 2\pi f$$

- rezistența ohmică a întregii înfășurări de excitație:

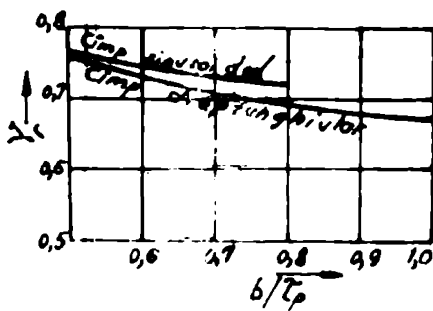
$$R_{ESE} = \rho_{75^\circ C} \frac{L_{NE} \cdot W_{ESE} \cdot 2p}{S_{ESE}} \quad (113)$$

În relația (113) " W_{ESE} " reprezintă numărul de spire pe poli al înfășurării de excitație a excitației, iar L_{NE} și S_{ESE} sunt lungimea medie și secțiunea transversală a acestor spire.

- rezistența ohmică a înfășurării de excitație redusă la rotor care se obține din rezistența întregii înfășurări de excitație (relația 113) și un factor de reducere " δ_r " astfel:

$$R'_{ESE} = \frac{\pi}{12} \frac{10^8}{f \frac{W_{ESE}}{p}} \cdot K_w \cdot \delta_r \frac{A}{L_{BS}} R_{ESE} \quad (114)$$

Acest factor de reducere " δ_r " reprezintă exprimarea solenației rotorice printr-o solenație echivalentă statică și se obține în funcție de rotorul " b_p/τ ". În figura 4.3 sunt reprezentate două cazuri obișnuite în exprimarea lui " δ_r " și anume: cazul în care cimpul este de formă dreptunghiulară, respectiv sinusoidală.



4.3 $\delta_r = f\left(\frac{b}{\tau_p}\right)$ la mașini sincroase cu poli aparenti

- reactanța de reacție a indusului după axa "d" este: $X_{ad} = K_d \frac{F_a}{\delta} \quad (115)$ unde " K_d " este coeficientul de reducere al cimpului rotorului la stator după axa "d"

- reactanța de dispersie a înfășurării de excitație " X_{ESES} " (B 49)

$$X_{ESES} = X_{ad}(\sigma_e - 1) \quad (116)$$

unde σ_e - coeficientul de dispersie al înfășurării

de excitație care se exprimă:

$$\sigma_e = K_d \left(K_d + \frac{2 F_a k_r \lambda}{\phi_1} 10^{-6} \right) \quad (117)$$

iar λ - permeanța specifică a polilor:

$$\lambda = \lambda_m + \lambda_p \quad (118)$$

unde λ_m, λ_p sînt pierderile specifice ale corpului polilor și tăb-pilor polare și a căror calcul se face astfel:

$$\lambda_m = \frac{1}{2} \frac{h_k}{c_m} + \frac{2,3}{\pi} \cdot \frac{h_k}{l_p} \log \left(1 + \frac{\pi}{2} \frac{b_k}{c_m} \right) \quad (119)$$

$$\lambda_p = \frac{h_{pm}}{c_p} + \frac{2,3}{\pi} \frac{2h_{pm}}{l_p} \log \left(1 + \frac{\pi}{2} \frac{b_p}{c_p} \right) \quad (120)$$

Iar elementele geometrice care intervin în relațiile (119,120) se observă în figura 4.4:

$$\begin{aligned} c_m &= \tau - b_k + \frac{\pi}{2p} (h_k + 2h_p + 2\delta) \\ c_p &= \tau - b_p + \frac{\pi}{2p} (h_p + 2\delta) \\ h_{pm} &= \frac{2h_p + h'_p}{2} \end{aligned} \quad (121)$$

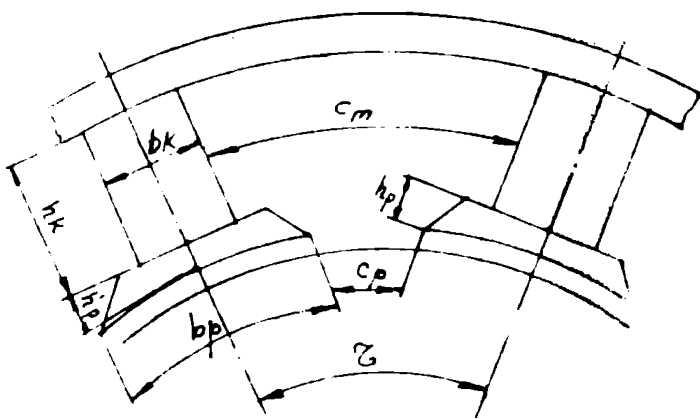


Fig. 4.4

Calculul vitezei de excitație se face pentru toate valorile corespunzătoare din matricile inițiale ale numărului de spire și înfășurării inductoare $E_{ESE}(1)$ și secțiunile corespunzătoare ale spirelor $E_{ESE}(j)$ și se determină variante pentru care se ob-

ține viteză de excitație maximă. După o verificare a posibilității de realizare constructivă se finalizează calculul pentru variante optimă a excitatoarei sincrone cu diode rotative.

4.3. Metodica practică de dimensionare a excitatoarei sincrone cu diode rotative

4.3.1. Dimensionarea excitatoarei sincrone în varianta inițială

Detale de excitație ale generatorului sincron principal și anume: puterea de excitație, curentul de excitație pentru diverse regimuri de funcționare (gol, sarcină, suprarsarcină), tensiunea de excitație, împreună cu cerințele impuse sistemului de excitație privind stabilitatea tensiunii și parametrii în regim tranzitoriu (factor de forțare și viteză de excitație), determină mărimile nominale ale excitatoarei sincrone cu diode rotative în curent alternativ.

Pentru a stabili tensiunea internă a excitatoarei se va mări tensiunea de excitație necesară la generatorul principal cu scăderea de tensiune din conductoarele de legătură dintre redresor și înfășurarea de excitație a generatorului principal, precum și cu scăderea de tensiune din redresorul rotativ cu diode (relațiile (87), (88), (89)). Având tensiunea, respectiv curentul continuu pe care îl va furniza excitatoarei cu diode rotative, și numărul de faze alea ($m=3$ - dacă redresorul rotativ cu diode este în punte trifazată cu dublă redresare sau $m > 3$, dacă redresorul rotativ cu diode este cu "conexiune serie"), se determină tensiunea efectivă pe fază și curentul efectiv pe fază, respectiv factorul de putere aparent al excitatoarei. (Tabelele III, IV, relațiile: (92), (95), (101), (103), (106)). Cu aceste elemente se calculează puterea aparentă a excitatoarei sincrone:

$$S_{ES} = m U_{ES} I_{ES} \cos \varphi \quad (122)$$

Deoarece excitatoarea funcționează la $\cos \varphi$ aprox. ~1 se mărește cu cea. 5-10% valoarea puterii aparente a excitatoarei sincrone. Pentru această putere se alege diametrul rotorului mașinii "D_{es}", ținând cont de tipul constructiv al excitatoarei (orientarea sa verticală) de turajis de embalare a generatorului principal și apoi se determină lungimea indusului excitatoarei "l".

Prevențe tensiunii electromotoare induse se alege în așa fel, încât pe de o parte puterea de excitație a excitatoarei să fie cât mai mică (figura 3.5), și pe de altă parte, viteza de excitație să fie cât mai mare. (Tabel II) și să rezulte în același timp un număr de poli "2p", pentru care dimensiunile, respectiv sollicitările magnetice din poli să fie corelate cu inducția din întrefierul excitatoarei de $B \delta = 0,4-0,6$ T. Tot din considerente constructive se preferă alegerea unui diametru rotor cât mai mare și reducerea corespunzătoare a lungimii mașinii, deoarece același diametru se va alege și pentru discul pe care se dispun diodele redresorului rotativ, în așa fel încât rotorul excitatoarei și discul cu diode să constituie o unitate funcțională și să se ușureze astfel, operațiile de montare - demontare pe arborele generatorului sincron principal.

Inducția în întrefierul excitatoarei la mers în gol și tensiunea nominală are valori normale cuprinse între 0,4-0,6 T în funcție de puterea mașinii, iar solențis specifică sau păture de curent a rotorului va avea valori cuprinse între 300-650 A/cm, valorile mai mari fiind pentru excitatoarele cu puteri mai mari.

La excitatoarele sincrone cu redresor rotativ se consideră ca normale următoarele valori ale inducțiilor în diferitele porțiuni ale circuitului magnetic la mers în gol și tensiune nominală respectiv la tensiunea de forțare de 1,8 ori tensiunea nominală:

	<u>Pt U_N</u>	<u>Pt 1,8 U_N</u>
- în dinții rotor la 1/3 din înălțimea dintelui	$B_{z1/3}$ 1-1,25 T	1,7-2 T
- în jugul rotor	B_{jr} 0,4-0,7 T	0,8-1,2 T
- în poli de excitație (statorici)	B_x 0,8-1 T	1,6-1,9 T
- în jugul stator	B_{js} 0,55-0,75 T	1-1,3 T

Din motive constructive (de pildă, posibilitatea de montaj) înălțimea jugului rotor respectiv a jugului stator pot avea astfel de dimensiuni, încât valorile inducțiilor în porțiunile respective să fie considerabil mai mici decât valorile indicate mai sus.

Densitatea de curent în înfășurarea rotorică are valori cuprinse între $j_1=3$ A/mm² până la 5 A/mm², fiind dependente de lungimea pachetelor elementare care compun miezul indusului și de viteza periferică a rotorului. Densitatea de curent în înfășurarea statorică se limitează la valori cuprinse între 1-1,5 A/mm². Această limitare la valori relativ mici ale densității de curent în înfășurarea de excitație se impune datorită condițiilor de ventilație mai dificile a acestei înfășurări statorice.

Numărul de spire pe fază "W" este important în calculul tensiunii electromotoare indusă și de asemenea în alegerea tipului de înfășurare rotorică (§ 2.2), pentru care se verifică apoi condițiile de simetrie (relațiile (4), (5), (6), (10)).

Avind aceste mărimi stabilite se calculează numărul de creștături pe poli și fază "q", pasul polar "Z", pasul creștăturii și lățimea dintelui pentru diverse înălțimi ale dintelui (1/2; 1/3; 1/1), lățimea tălpii polare "b_p", pentru un factor de acoperire polară $\alpha_c \approx (0,7-0,85)$, înălțimea jugurilor rotor și stator, precum și factorii de înfășurare pentru bobinajul rotor și factorii lui Carter pentru calculul tensiunii magnetotoare din întrețierul excitatoarei.

După alegerea întrețierului (Tabel II), calculul factorilor de formă "K_φ" - al curbei cimpului și "K_λ" - al tălpii polului, se continuă cu calculul caracteristicii de mers în gol al

excitatorei, după ce în prealabil s-au stabilit lungimile liniilor de câmp pentru principalele porțiuni ale circuitului magnetic.

Pentru calculul tensiunii magnetotoceze în poli de excitație și în jugul stator se va lua în considerare fluxul:

$$\Phi_K = \Phi + \Phi_{\sigma} \quad (123)$$

care se decompune de fluxul Φ prin fluxul de dispersie Φ_{σ} ce se poate determina cu ajutorul factorilor de dispersie " σ_K " pentru corpul polilor și " σ_p " pentru tălpile polare (B 61).

Tensiunea magnetotoceze totală se determină pentru mai multe valori ale tensiunii (0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2; I UN), necesare pentru trasarea caracteristicii de mers în gol.

Pentru determinarea tensiunii magnetotoceze la funcționarea în sarcină nominală a excitatorei se calculează în prealabil tensiunea magnetică de reacție a indușului, apoi calculul se efectuează cu metoda diagramei medii transpuse analitic (B 39). În acest scop se exprimă principalele reactanțe pentru regimul staționar și tranzitoriu și anume: reactanța de reacție a indușului după axa longitudinală " X_{qd} ", după axa transversală " X_{dq} ", reactanța de dispersie a indușului " X_{σ} ", reactanța sincronă longitudinală și transversală " X_d ", " X_q ", reactanța de dispersie a înfășurării de excitație " X_{ESE} " și reactanța tranzitorie longitudinală " X'_d ".

Cu aceste elemente se face calculul tensiunii magnetotoceze la sarcină nominală, care raportată la numărul de poli și la curentul de excitație nominal admis pentru excitație, determină numărul de spire " N_{ESE} " al înfășurării de excitație. Înfășurarea de excitație de pe poli stator se realizează prin conectarea în serie a tuturor polilor și va avea rezistență ohmică la temperatura normală de funcționare (aprox. 75°C) calculată conform relației (113). Tensiunile de excitație pentru regimul de mers în gol, nominal și de forțare cunoscând curenții de excitație sînt:

$$U_{ESE0} = R_{ESE} \cdot I_{ESE0} \quad (124)$$

$$U_{ESEn} = R_{ESE} \cdot I_{ESEn} \quad (125)$$

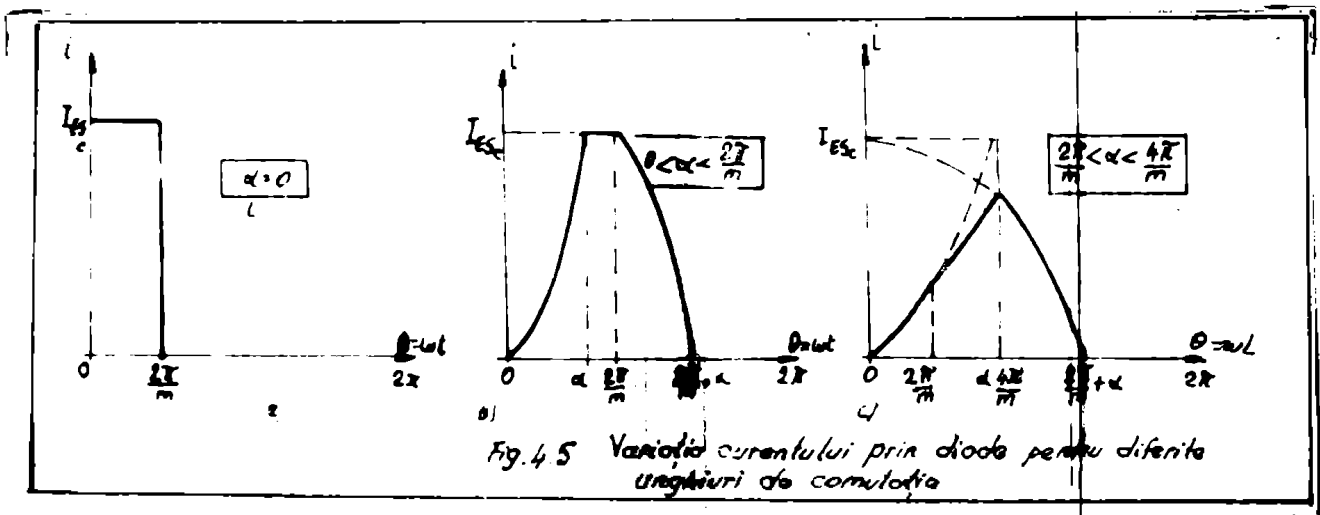
$$U_{ESEf} = R_{ESE} \cdot I_{ESEf} \quad (126)$$

Elementele determinate mai sus constituie datele inițiale ale excitatorei sincrone, necesare pentru programul de calcul pe baza criteriului de optimizare ales, al vitezei de excitație variabilă.

4.3.2. Dimensionarea punții redresoare cu diode rotative

Puntea redresoare cu diode rotative se proiectează astfel, încât să formeze o unitate constructiv funcțională cu inductorul excitatoarei sincrone și să asigure conectarea directă la înfășurarea de excitație a generatorului sincron principal. La dimensionarea punții redresoare rotative, cel mai important aspect îl constituie alegerea diodelor semiconductoră, ținând cont de puterea instantanee ce se dezvoltă în joncțiune și de faptul că se poate evacua o putere superioară funcționării lor în regim staționar, determinată răcirii forțate stivă a diodelor, cât și a radiatorilor în care sînt montate acestea.

Puterea instantanee dezvoltată în joncțiune este funcție de curent și deci curentul continuu admisibil depinde de forma curentului prin diodă, adică de numărul de faze și de unghiul de comutație, după cum se observă în figura 4.5 a, b, c (B 37).



Căderea de tensiune directă este dată de produsul diodelor și cu ajutorul ei se poate determina puterea dezvoltată pentru o variație a curentului prin diodă în funcție de timp pentru o perioadă "T" cu relație:

$$\frac{1}{T} \int_0^T P dt = P_m \quad (127)$$

în care P_m - este puterea medie pe care o poate evacua dioda, cunoscută din datele de catalog ale diodelor.

Ecuația (127) permite determinarea curentului mediu admisibil prin diode.

În alegerea diodelor (tipul și numărul de suprafețe montate în paralel) pe lângă regiunea de forțare considerată ca regiunea normală de funcționare, se consideră pentru mărirea siguranței în explo-

tare și regimurile de avarie (scurtecircuite) în care cea creșterea curentului este de aprox. 2-3 ori peste valoarea nominală, în funcție de mărimea generatorului principal.

Diodele utilizate în mod obișnuit având curentul mediu redresat $I_D = 400-500$ A, asigură bună funcționare a excitatoarei și în cazul regimurilor de avarie.

Un aspect important în funcționarea redresorului rotativ îl constituie comportarea mecanică a diodelor la solicitările datorate forței centrifuge ce acționează asupra lor în regimul de amelare. Diodele rotative trebuie să suporte fără deteriorări accelerații maxime de 6500 gr. (B 60). Deoarece majoritatea diodelor utilizate au fost construite pentru o funcționare în regim static, ele au fost verificate în mișcare de rotație, iar la mașinile cu turație foarte ridicată ($n > 1500$ rpm) s-a trecut la folosirea unor diode cu contact sub presiune și răcire pe ambele fețe, diodele montându-se astfel, ca forța centrifugă să se adauge presiunii de contact.

La proiectarea punții redresoare rotative se ține seama de două aspecte principale și anume: solicitarea punții sub aspectul curentului și al tensiunii. Proiectarea punții redresoare pentru curent se face considerând regimul de forțare al excitatoarei ca regim de durată și se procedează în mod distinct pentru cele două tipuri de conexiune a redresorului rotativ cu diode. Astfel, la redresorul cu "comutație paralel dublu", realizat practic sub formă punții trifazate cu dublă redresare, numărul de diode ce urmează a fi conectate în paralel pe braț de punte este (B 1):

$$N_p = \frac{K_f I_{ENG}}{3 I_D K_s} \quad (128)$$

în care N_p - este numărul de diode legate în paralel pe braț de punte, I_{ENG} - curentul de excitație nominal al generatorului principal, I_D - curentul redresat maxim admis pe diodă și K_s - factor subunitar (de obicei $K_s \approx 0,8$) ce ține cont de repartizarea neuniformă a curentului în diodele conectate în paralel.

Numărul de diode stabilit astfel, nu prevede și diodele de rezervă. În general cu o singură diodă de rezervă pe grup de diode legate în paralel, pe o fază, se obține o siguranță suficientă în exploatarea acestui sistem.

La redresorul rotativ cu "comutație serie", se determină curentul mediu prin diodă, pentru regimul de forțare a excitației astfel:

$$I_{omed} = \frac{K_f I_{ENG}}{m} \quad (129)$$

Din relația (129) se observă că pentru un anumit tip de diode ales se poate micșora curentul mediu prin mărire numărului de faze al excitatoarei sincrone. Rezerva în acest caz este asigurată de fazele vecine, cu condiția de a nu introduce asimetrii sub poli diferiți.

În ceea ce privește dimensionarea punții redresoare sub aspectul tensiunii se ține seama de posibilitatea funcționării în regim asincron, cu generatorul conectat la rețea, cu întreruperea accidentală a curentului de excitație sau la disrupția scurtcircuitului pînă la sincronizare, cînd se produce o tensiune care nu crește peste 2-3 ori tensiunea nominală de excitație (B60), la generatoarele cu puteri pînă la 60-150 MVA, în cazul în care evaria se produce la puterea nominală a mașinii. La unele tipuri de redresoare utilizate, pentru toate tensiunile ce provin din circuitul de excitație al generatorului principal se găsesc două diode legate în serie, astfel că o diodă preia de fapt numai jumătate din această tensiune. De aceea se consideră că o dimensionare a punții redresoare la o tensiune de 5 ori tensiunea nominală prezintă o siguranță suficientă în funcționare. Cu diodele care se fabrică în prezent avînd tensiunea inversă de lucru $U_{inv\ max} = V_{RWM} = V_{RSM} = (1300-2300V)$ se poate realiza cu ușurință acest factor de siguranță, fără a conecta mai multe diode în serie și fără a necesita protecții suplimentare la supratensiuni.

Pentru aprecierea instalației de redresoare rotative se determină apoi factorul de ondulare, factorul de utilizare, precum și pierderile totale din redresor.

În general redresorul rotativ avînd diodele dimensionate pentru solicitările din regiunile de funcționare exatate (forțarea excitației, scurtcircuite, etc.) și în plus o rezervă prevăzută, garantează fiabilitatea în ansamblu a excitatoarei sincrone cu diode rotative.

4.4. Programul de optimizare al excitatoarei sincrone pe baza criteriului vitezei de excitație maxime, pornind de la varianta inițială.

Pentru proiectarea optimă a excitatoarei sincrone cu diode rotative am elaborat un program de calcul original, bazat pe repetarea calculelor cu valori diferite ale numărului de spire și infășurării de excitație a excitatoarei " W_{ESE} " și ale secțiunii acestor spire " S_{ESE} ", până ce se obține viteze de excitație dorită, programul de calcul fiind structurat conform schemei logice din figura 4.6.

Calculul vitezei de excitație necesită determinarea variației tensiunii redresate a excitatoarei cu diode rotative pornind de la tensiunea nominală, în timpul procesului de formare al excitației, utilizând relație stabilită (relație 77).

Constanta de timp a excitatoarei care intervine în relație (77) se exprimă cu parametrii calculați, conform relației (112). Înlocuind în relație (112) expresia rezistenței infășurării de excitație a excitatoarei din relațiile (113) și (114) constanta de timp devine:

$$T_{ESE} = K_{ESE} \cdot W_{ESE} \cdot S_{ESE} \quad (130)$$

unde:

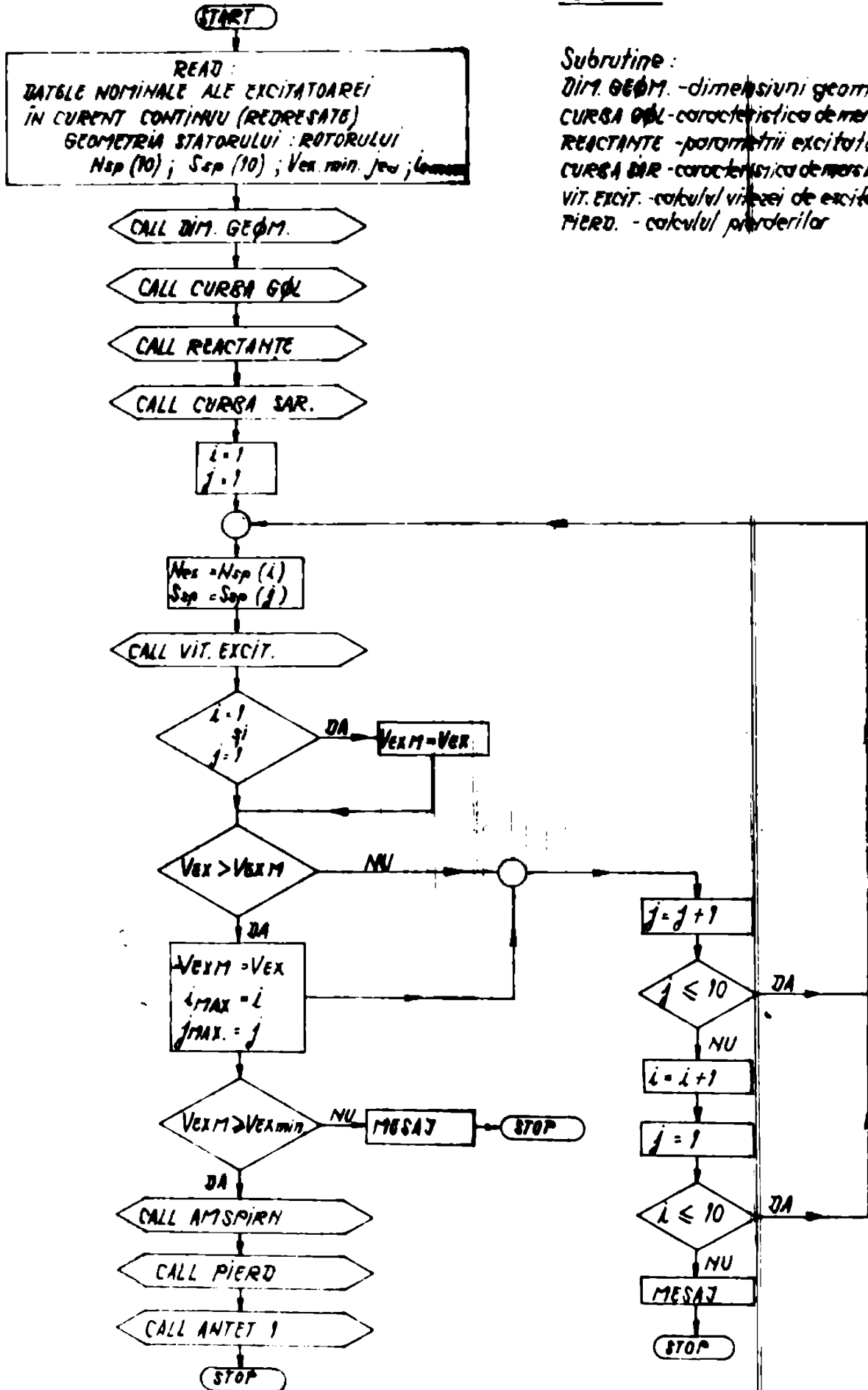
$$K_{ESE} = \frac{12 X_{ESE} l_i B \delta}{\pi^2 10^8 A p \cdot K_w \gamma_r L_{WE}} \quad (131)$$

Din expresia (130) se observă că pentru o variantă de mașină aleasă, deci cu mărimile care intervin în relație (131) menținute fixe (inducție în întrefier, solenție specifică, dimensiuni geometrice principale), constanta de timp a excitatoarei depinde de numărul de spire și infășurării de excitație a excitatoarei " W_{ESE} " și de secțiunea acestor spire " S_{ESE} ".

această dependență s-a prezentat în figura 4.7 și 4.8, iar valorile limită ale mărimilor variabile sînt determinate din condițiile restrictive din programul de calcul.

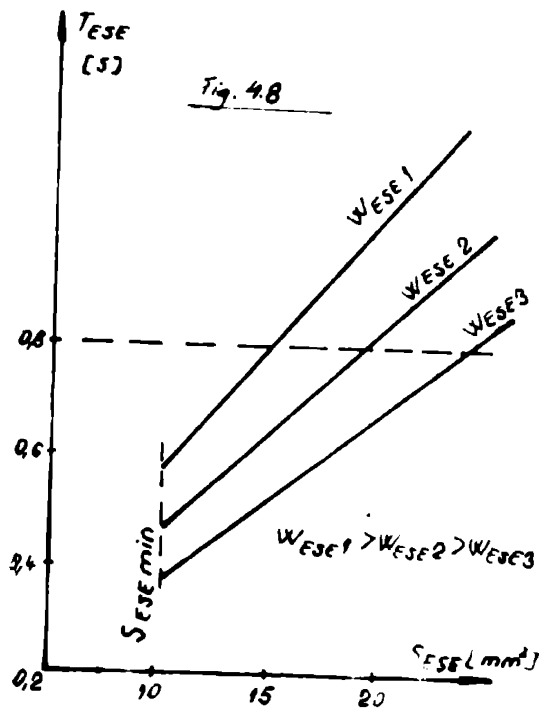
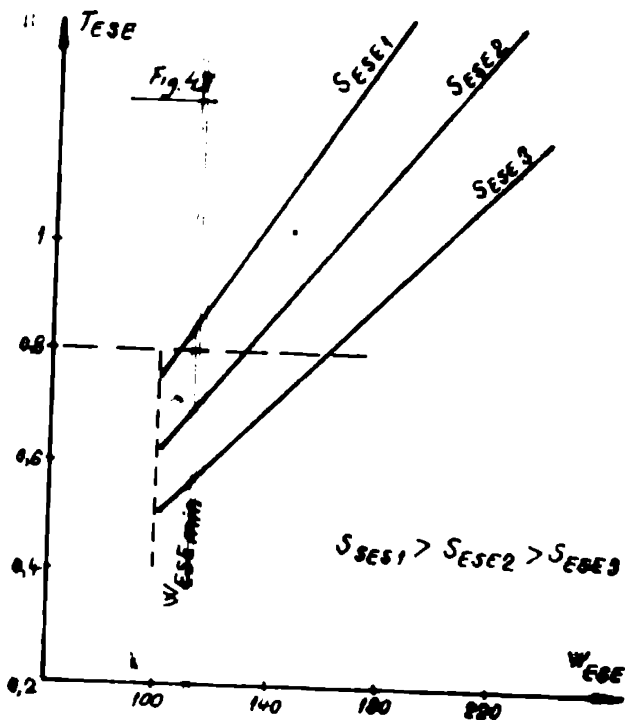
Schema logică și programul de calcul optimal al E.S.D.R.
Schema bloc

Fig. 4.6



Subrutine :

- DIM. GEOM. - dimensiuni geometrice
- CURBA GOL - caracteristica de mers in gol
- REACTANTE - parametrii excitațoare
- CURBA SAR - caracteristica de mers in sarcina
- VIT. EXCIT. - calculul vitezei de excitație
- PIERD. - calculul pierderilor



Condițiile limită referitoare la numărul de spire se realizează prin impunerea unui curent de excitație, nominal al excitatoarei admisibile:

$$W_{ESE_{min}} \geq \frac{F_{en}}{2 I_{ESEn}} \quad (132)$$

iar referitor la secțiunea spirei, printr-o densitate de curent maximă admisibilă:

$$S_{ESE_{min}} \geq \frac{I_{ESEn}}{J_{ESE_{max}}} \quad (133)$$

Cu valoarea constantei de timp a excitatoarei " T_{ESE_0} " calculată pentru varianta inițială se determină variația tensiunii $U(t)$. Din relație (77) se observă că valoarea tensiunii $U(t)$ la momentul $t=0$ este chiar $U=U_{E0}$. Pentru a determina în continuare valorile $U(t)$, vom da o serie de valori variabilei timp " t ", de exemplu $t_1 = \Delta t$ și se exprimă tensiunea excitatoarei, apoi se calculează valorile acesteia la momentul $t_2 = 2 \Delta t$. Calculul continuă în acest mod precizia fiind determinată de mărimea intervalului de timp ales " Δt ". Progresul calculatorului se realizează în așa fel, încât să se obțină valorile discrete ale tensiunii în momentele $t_k = k \Delta t$. Astfel, se ajunge la o valoare $t = t_{max}$ corespunzătoare tensiunii de forțare impuse U_{Eg} . Din curbe $U(t)$ se determină valoarea $U^* = U_{Eg} + 0,632(U_{Eg} - U_{E0})$, pentru care corespunde o anumită valoare a timpului $t = t_1$, cu care se calculează viteza de excitație nominală a excitatoarei cu relația (79). Această valoare a vitezei de excitație s-e determinat cu constante de timp a ex-

excitatorului T_{RSE} , calculată pentru variante inițiale a înfășurării de excitație a excitatorului, deci pentru un anumit număr de spire N_{RSE} , care constituie valoarea inițială ($i=$) și corespunzător valorii inițiale a secțiunii spirei de excitație S_{RSE} ($j=1$) așa cum se observă în schema bloc din figura 4.6.

Pentru determinarea variantei optime se utilizează două cicluri repetitive de tip "DO". Printr-unul se calculează viteza de excitație pentru toate secțiunile din matricea inițială a secțiunilor firului de cupru al înfășurării de excitație $S_{RSE}(j)$ pentru $j=1..n$ și prin celălalt se calculează viteza de excitație pentru variantele numerelor de spire al înfășurării de excitație din matricea $N_{RSE}(i)$ pentru $i=1..m$. Totul se termină fiind cele două variabile de control "i,j" și-au depășit valorile finale respective ($i_{max}=i$, $j_{max}=j$).

În corpul ciclului se calculează viteza de excitație pentru diverse valori ale constantei de timp a excitatorului T_{RSE} care la rândul ei se calculează pentru valorile secțiunii cuprului și pentru numărul de spire al înfășurării inductoare din matricea inițială care satisfac condițiile de limită impuse în programul de calcul (relațiile (132),(133)).

După calculul vitezei de excitație maxime se verifică dacă aceasta este mai mare sau egală cu viteza de excitație minimă impusă de datele inițiale ($v_{ex,min}$). Dacă această condiție nu este îndeplinită atunci se schimbă valorile din matricele numărului de spire și secțiunii cuprului înfășurării inductoare și se reia calculul de la început. În cazul în care condițiile sînt satisfăcute, înseamnă că s-a determinat varianta optimă pentru viteza de excitație și se continuă programul de calcul cu calculul pierderilor și cu afișarea rezultatelor.

Grafic se verifică ulterior, posibilitatea cuplării înfășurării de excitație în fereastra interpolară a statorului excitatorului, care este realizabilă în majoritatea cazurilor, deoarece matricele cu valorile numărului și secțiunii spirei ele se inițial, se învecină într-un domeniu frecvent utilizat la mașini similare.

Programul de calcul optimel, conform schemei bloc din figura 4.6 cuprinde datele de intrare necesare efectuării calculului (RSAD), care se indică în cererile de rulare și o serie de subrutine pentru: calculul dimensiunilor geometrice (DIMGEOM) a

caracteristicii de mers în gol (CURBAGCL), a caracteristicii de mers în sarcină (CURBASAR), a parametrilor (REACTANTE), apoi ciclul pentru optimizarea vitezei de excitație (VITEXCITMAX), a pierderilor și de afișare a rezultatelor.

Programul este structurat sub forma unui program principal care citește datele inițiale, apelează subrutinele și închide JB-ul și subrutinele care calculează și afișează fiecare rezultatul calculat. Anumite subrutine realizează ciclul de optimizare și apelează la altele (de exp. pentru interpolări în tabele).

Aplierea programului de calcul optinel permite alegerea celei mai bune variante de înfășurare inductoare, printr-un număr relativ mic de iterații și ținând cont de posibilitățile reale ale uzinei producătoare, în sensul că matricea secțiunilor înfășurării de excitație a excitatoarei R_{EEXE} (j) se extinde sau se limitează la un singur tip, reconstituindu-se la situația concretă de aprovizionare cu acest tip de conductor de cupru.

În anexă se prezintă un model de cerere de rulare pentru calculul unei excitatoare sincrone cu diode rotative.

CAPITOLUL V

APLICAȚIA PRACTICĂ A METODICII PROPUSE, REZULTATE EXPERIMENTALE

5.1. Rezultatele proiectării unei game largi de excitatoare sincrone cu diode rotative uti- lizate la hidrogenatoarele sincrone

Printre soluțiile moderne în concepția și realizarea hidrogenatorilor se înscrie și sistemul de excitație al hidrogenatorilor, cu excitatoare sincrone cu diode rotative, care a fost folosit prima oară în țară la hidrogenatoarele de la centralele hidroelectrice de la Greble și Mobra, ulterior, soluția s-a extins la o gamă largă de hidrogenatoare, cel mai mare realizat, în concepție proprie fiind cel de la centrala hidroelectrică Rîul-Mare Heteșet.

În tabelul V sînt prezentate hidrogenatoarele din țară, de puteri cuprinse între 2 MVA și 190 MVA și de turații între 100 și 1000 rpm echipate cu excitatoare sincrone, cu diode rotative. Aceste excitatoare sînt de concepție românească proiectate de CCSITM Reșița, la conceperea lor autorul participînd încă de la început.

Sistemele de excitație au fost concepute atât pentru funcționarea în regim manual de reglare a excitației, prin reostat de excitație, cât și pentru regimul de reglare automată prin regulator automat de tensiune. Regulatorul automat de tensiune utilizat la excitatoarele sincrone cu diode rotative este cu dublu canal de reglare, care presupune, în afara căii de reglare a tensiunii, un al doilea canal complet independent servind pentru ajustarea manuală a curentului de excitație. El este în întregime electronic, avînd etajele finale de forță realizate cu tiristoare montate în punte complet comandată. Canalul de reglare automată a tensiunii realizează următoarele funcțiuni: excitarea automată a generatorului cu posibilitatea varierii tensiunii (în gol) între (0,85-1,15) Unăgră-lizarea tensiunilor generatorului cu sistemul în vederea cuplării în paralel; forțarea excitației în cazul unui scurtcircuit în sistem; limitarea duratei de forțare și a plafonului său; limitarea curentului minim de excitație. Regulatorul automat de tensiune debitează pe înfășurarea de excitație a excitatorului sincrone, iar alimentarea se face de la serviciile interne, sau printr-un transformator special, direct de la bornele generatorului prin-

TABEL CU EXCITATOARELE SIMCRONE CU DIODE ROTATIVE, PROTECTATE, EXECUTATE (în curs de execuție) ȘI PASE ÎN 4

FUNCTIUNE ÎN CENTRALILE HIDROELECTRICE

Tabel II

№. crt.	Amplasare	Pondere excitațională (KVA)	Pondere totală (KVA)	Capacitate de lucru (KVA)	Tensiune de lucru (V)	Coeficient de utilizare (%)	Timp de funcționare (h)	Tipul curentului	№. de diode	№. de diode în rezervă	Factor de siguranță	Coeficient de siguranță	Pondere de excitație (KVA)	Pondere de protecție (KVA)	Pondere totală (KVA)	Coeficient de siguranță	Coeficient de siguranță
1	CHE Mokru	140	75	650	34.000	160	680	750	1	2	2,4	11	22	0,35	1,1	50	2,3
2	CHE Gredia	58	60	389	6.800	110	436	750	3	2	2,15	6	14	0,1	0,42	50	1,9
3	CHE R.M. Rector	480	30	945	186.000	225	1.650	500	17	2	3,7	12	26	0,333	2,5	68,66	2
4	CHE Arceni	250	50	560	22.000	200	930	94,75	9	1	4,75	18	40	0,57	2,8	10,93	1,4
5	CHE Drobeta	260	53	460	25.000	240	820	100	9	1	1,9	14	42	0,4	2,2	11,66	1,4
6	CHE Turnu	300	60	570	39.100	220	1030	115,4	9	1	2,2	16	40	0,56	3,52	12,46	1,4
7	CHE Golden	280	60	540	21.000	235	1050	93,7	9	1	2,2	16	40	0,58	3,68	12,82	1,4
8	CHE Timbo	255	107	780	66.000	240	873	428,6	3	1	1,7	11	30	0,2	4,53	35,4	1,8
9	CHE Sigg	240	89	386	85.000	270	780	428,6	7	1	2,5	28	39	1,322	3,8	64,8	2
10	CHE Bradisor	260	98	780	62.000	220	850	375	3	1	2,5	6,1	26	0,485	1,7	27,25	1,6
11	CHE Colibita	120	40	900	25.000	110	1000	600	3	1	2,25	16	33	0,576	2,45	50	3,5
12	CHE Herculane 1	30	35	185	2.130	55	203	600	3	1	4,5	14	22	0,3	0,726	40	1,8
13	CHE Herculane 2	70	60	197	5.750	130	345	333,3	6	1	2,1	14	21	0,41	0,95	27,77	1,8
14	CHE Herculane 3	120	60	670	29.000	140	820	600	3	1	2,2	12	30	0,32	1,08	50	2,2
15	CHE Reborn	150	43	515	24.000	175	698	375	7	1	2,35	15	24	0,5	1,35	31,25	1,6
16	CHE Lersyah	100	37	390	22.500	110	670	600	7	1	2,1	14	35	0,45	2,5	40	1,9
17	CHE Golgh	66	42	210	44.500	130	430	116,4	7	1	3,25	15	28	0,8	2,4	20,46	1,3
18	CHE Remeti	280	57	350	60.500	180	1035	428,6	7	1	2,4	16	40	0,65	3,84	35,68	1,8
19	CHE Cluj	135	55	355	34.000	160	680	500	6	1	2,45	16	30	0,55	1,955	41,68	1,6
20	CHE Cluj	70	40	300	6.300	100	580	600	6	1	1,95	14	29	0,39	1,7	50	2
21	CHE Ruzica	35	11	315	6.850	45	630	1000	7	1	9	9	21	0,1	0,44	66,66	2,8
22	CHE Gula	274	69	305	15.700	385	554	75	13	1	4	18	26	1,3	2,7	15	1,1
23	CHE Voisest	48	11	480	6.250	40	570	600	6	1	1,6	14	30	0,32	1,44	50	1,4
24	CHE Cămin	42	34	410	4.160	75	460	500	3	1	2,6	10	21	0,21	0,95	32,32	1,7
25	CHE Turnu-Reni	310	83	514	85.000	250	920	428	7	1	3	26	39	2	4,5	64,3	2
26	CHE Crămpoiești	45	36	498	11.220	70	490	750	3	1	2	14	30	0,4	1,8	50	1,9
27	CHE Rul	110	94	395	9000	220	480	214,3	3	1	3	19	42	1,21	5,8	28,57	1,5

cipal. Decerea etajului final al regulatorului este realizată dintr-o punte cu tiristoare complet comandată, sciderea sau stingerea curentului de excitație al excitatoarei se produce extrem de rapid prin trecerea în regim de invertor.

În cazul în care o avarie conduce la oprirea mașinii, după deconectarea întreprinzătorului principal, indiferent de regiunile de funcționare al regulatorului (automat sau manual) se comandă trecerea în regim de invertor și deci stingerea rapidă a curentului de excitație. În acest fel tensiunea la bornele generatorului principal, practic nu mai este influențată de tensiunea de excitație, variația ei în timp fiind determinată de constante de timp a înfășurării de excitație a generatorului sincron principal. Regulatorul automat de tensiune adaptat pentru excitatoarea sincronă cu diode rotative nu are nevoie de măsura tensiunii rotorice redresate, această mărime fiind obținută indirect, prin măsurarea curentului de ieșire al regulatorului și deci și la funcționarea în regim automat nu sînt necesare înalte de contact și perii. Acest regulator se execută în două variante și anume pentru un curent de excitație al excitatoarei de maximum 35 A, respectiv de maximum 50 A, iar tensiunea de alimentare este aceeași la ambele variante de 2300 V.c.c.

Proiectarea unei game largi de excitatoare sincrone cu diode rotative care diferă între ele prin putere, tensiune, turție și regim de funcționare, reglaj exclusiv manual al excitației (pentru mașini de mică putere) și reglaj automat, cu trecerea la funcționarea în regim manual și invers (pentru puteri mijlocii și mari) a făcut necesare soluții constructiv-funcționale diverse, dar avînd la bază o concepție unitară. Dintre excitatoarele sincrone cu diode rotative prezentate în Tabelul V, o parte funcționează de mai mulți ani în centralele hidroelectrice, o altă parte au fost înscrise la uzina producătoare (I.C.H. Reșița), iar restul se află în execuție sau urmează să fie lansată în fabricație. Datele nominale ale hidrogeneratorilor se inscriu în următoarele limite: puteri cuprinse între 2000 KVA și 186.000 KVA, turțiile de la 93,7 la 1000 rpm, tensiunile de excitație de la 93 V la 400 V, curenții de excitație nominali de la 295 A la 1650 A. Pentru fiecare hidrogenerator se precizează în același tabel datele nominale ale excitatoarelor sincrone cu diode rotative corespunzătoare și anume: puterile nominale de la 30 KVA la 460 KVA, tensiunile pe fază (valoare efectivă) de la 17 la 107 V, curenții pe fază (valoare efectivă) de la 185 la 980 A,

numărul de faze de la 3 la 17, frecvențe tensiunii induse între 11,4 și 66,66 Hz, tipul redresării și numărul de diode în paralel din instalația de redresare, curenții și puterile de excitație ale excitatoarelor pentru regimul de mers în gol și de mers în sarcină.

Curenții și puterile de excitație ale excitatoarelor sincrone cu diode rotative la funcționarea în sarcină nominală și la forțarea excitației trebuie corelate cu parametrii esențiali în regimul nominal și de forțare a excitației de către regulatorul automat de tensiune, care asigură la funcționarea în regim automat infășurarea de excitație a excitatorului. Colocarea finală a tabelului centralizator conține valorile vitezei de excitație calculate. Aceste valori sînt aproximativ egale cu cele ale vitezei de excitație determinate la excitatoarele clasice de curent continuu, de puteri și turații apropiate de cele ale excitatoarelor sincrone cu diode rotative.

În proiectarea excitatoarelor sincrone cu diode rotative s-au adoptat soluții tehnologice care să simplifice fabricația și să contribuie la reducerea prețului de cost. Dintre aceste măsuri relevăm: păstrarea aceleiași tole pentru rotor stator și poli de excitație, la mașinile cu puteri apropiate în vederea reutilizării ștanțelor și EDV-urilor, tipizarea dimensională a instalației de redresare rotativă (disc suport, radiator), a dispozitivelor de supraveghere și protecție a diodelor, a reostatelor de excitație și a rezistențelor de demeritare.

Funcționarea de mai mulți ani a excitatoarelor sincrone cu diode rotative a dovedit o fiabilitate bună a sistemului, dar au existat și unele neajunsuri constatate în special la început, legate de sistemul de supraveghere a diodelor rotative, care s-au realizat cu înfrângere întreruperea sau scurtcircuitarea diodelor.

Pentru creșterea siguranței în funcționarea excitatoarelor sincrone cu diode rotative se introduce un sistem de supraveghere selectiv, capabil să indice locul de montare al diodei defecte, care să înlocuiască sistemul de supraveghere indirectă utilizat în prezent, iar pentru creșterea siguranței în funcționarea a generatorului principal se prevede alimentarea excitației excitatorului de la serviciile interne și de la bateria de acumulatori a centralei.

3.2. Dimensionarea unei excitatoare sincrone cu diode rotative pentru excitarea unui generator sincron de 6000 KVA, 6,3 KV, 750 rpm

Pentru un generator sincron dat se exemplifică modul de aplicare și rezultatele calculului de proiectare al unei excitatoare sincrone cu diode rotative, folosind metodele și programul de calcul original stabilit în capitolul IV.

Hidrogenatorul are următoarele date nominale: puterea aparentă 6000 KVA, tensiunea de linie 6300 V, curentul de fază 634 A, frecvența 50 Hz, factorul de putere $\cos \varphi = 0,8$ și turația 750 rpm, obține puterea de excitație necesară de la o excitatoare sincronă trifazată cu diode rotative, montată în conexiune pe erboarele său.

Din calculul electromagnetic al hidrogenatorului se determină curentul său nominal de excitație $I_{EXG} = 436$ A și adăptând tensiunea nominală de excitație $U_{EXG} = 110$ V (aceasta fiind valoarea standardizată cea mai apropiată de cea calculată cu rezistența înfășurării de excitație a hidrogenatorului), rezultă puterea de excitație a generatorului sincron $P_{EG} = 436 \cdot 110 = 48000$ W.

Tensiunea continuă la bornele redresorului rotativ $U_{DCC} = 115$ V este mai mare decât tensiunea nominală de excitație a generatorului sincron (conform relației (89)), iar curentul de excitație redresat al excitatoarei $I_{EXG} = 478$ A este de asemenea majorat (usual între 5-10%), față de curentul de excitație nominal al generatorului. Curentul redresat al excitatoarei fiind relativ mic (478 A), iar tensiunea redresată având o valoare mijlocie (115 V) este preferabilă, în acest caz, o excitatoare sincronă, în variante trifazată cu redresor cu comutație paralel dublă. La aceste valori nominale ale curentului și tensiunii redresate, corespunde în curent alternativ în faza excitatoarei sincrone trifazate cu diode rotative, un curent de fază $I_{FG} = 389$ A (conform relației (95)), o tensiune de fază $U_{FG} = 51$ V (relația (97)) și o putere nominală $S_{FG} = 58$ KVA (relația (98)).

Funcționarea în regim tranzitoriu impune ca, excitatoarea sincronă cu diode rotative să asigure un factor de forțare $K_f = 1,6$ u.r. (conform standardelor (B 64)) timp de 10 secunde și o viteză de excitație minimă $v_{exmin} = 1,5$ u.r./sec. (conform (B 64)), valoarea aceasta fiind suficientă din considerente de siguranță în funcționarea a hidrogenatoarelor sincrone cu puteri nominale

mai mari decât 4000 KVA. Pentru aceste condiții de funcționare determinate de forțarea excitației, excitatoarea sincronă cu diode rotative trebuie să asigure pe timp limitat (maxim 10 secunde) tensiunea și curentul necesar hidrogenatorului sincron.

Referitor la principalele rezultate ale calculului electro-magnetic și de optimizare al excitatoarei sincronă cu diode rotative care se prezintă sub formă tabelară precizăm următoarele: la alegerea înfășurării indusului excitatoarei s-a optat pentru o înfășurare trifazată, de tip ondulat, în două straturi, cu o cale de curent în paralel ($a=1$), obținută dintr-o înfășurare de indus de curent continuu a cărei schemă de bobinaj se prezintă în exemplul din figura 2.6 (§ 2.2). Datele înfășurării verifică condițiile de simetrie (§ 2.2, relațiile (4), (6), (8), (9)), iar elementele de bază sînt: pașii în număr de crestături: $y=17$, $y_1=8$, $y_2=9$, pașii pentru punctele de incizie a înfășurării: $y_{v1}=204$, $y_{v2}=187$, scurtarea înfășurării $k_y = \beta = 0,94$ iar factorul de înfășurare al armonicii fundamentale $k_y = 0,975$. Fiecare bază elementară s-a divizat în conductori elementari în vederea reducerii pierderilor suplimentare (§4.1, figura 4.2) și s-a realizat transpoziția barelor în partea frontală. De asemenea s-a ales o viteză relativ mică pentru densitatea de curent la înfășurarea rotorică ($j_{rs}=2,6 \text{ A/mm}^2$), prin faptul că, mașina este prevăzută cu autoventilația și trebuie să asigure un curent dublu pe timpul regimului de forțare a excitației.

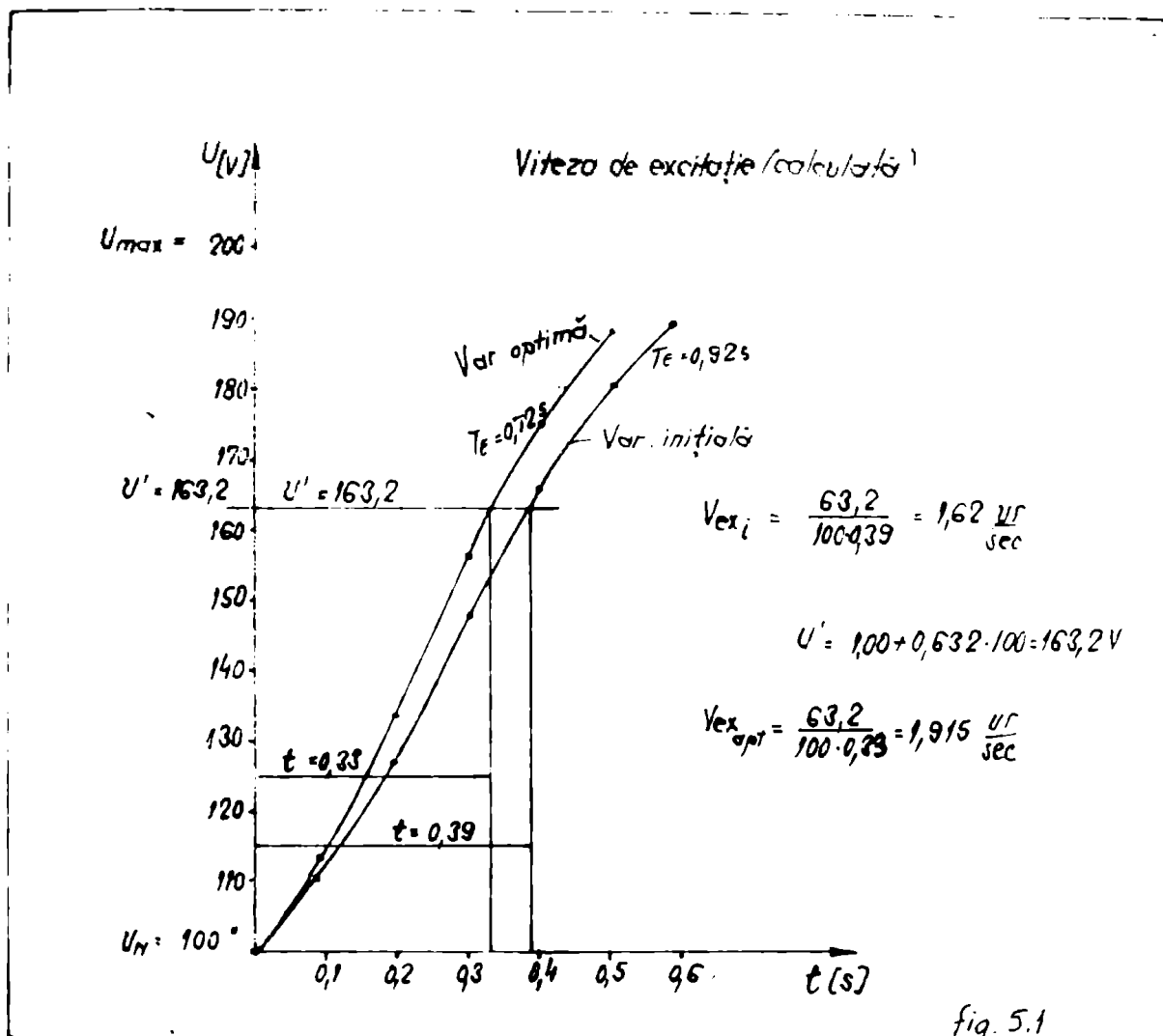
Sintetizăm mai jos principalele rezultate ale calculului excitatoarei sincronă cu diode rotative:

Nr. crt.	Denumirea	Simbol	Valoarea calculată	Unitate de măsură
Dimensiuni principale				
1.	Diametrul exterior indus	D_{ex}	0,7	m
2.	Diametrul interior indus	D_{ix}	0,43	m
3.	Lungimea indusului	L	0,17	m
4.	Lungimea pechetelor	l_p	0,15	m
5.	Lungimea unui pechet	l_{p1}	0,05	m
6.	Numărul pechetelor de teie	n_p	3	buc.
7.	Pașii polari	τ_p	0,274	m
8.	Numărul cunșlelor radiale de ventilație	n_s	2	buc.
9.	Frecvența tensiunii induse	f	50	Hz

Nr. crt.	Denumirea	Simbol	Valoarea calculată	Unitate de măsură
10.	Viteza periferică a indusului	v_p	27,5	m/sec.
11.	Numărul de poli	$2p$	8	duc.
<u>Infăşurarea indusului</u>				
12.	T.v.m. indusă pe fază în gol	U_{ES00}	55	V
13.	Inducţia în întrefier	B_f	0,35	T
14.	Fluxul	Φ	1,2	Wb
15.	Numărul de spire pe fază	w	25	
16.	Numărul de conductori elementari pe bară	c	12	
17.	Secţiunea conductorului	S_{ESb}	149	mm ²
18.	Numărul de creştături	z	69	
19.	Numărul de laturi de spirală pe creştătură	$2n_1$	2	
20.	Rezistenţa infăşurării pe fază la 75 C	R_f	0,00475	ohmi
21.	Încălzirea liniară	Δ	245	1/cm
<u>Date pentru caracteristicile de mers în gol</u>				
22.	Întrefierul minim sub polul de excitaţie	δ	7,5	mm
23.	Pesul creştăturii	t_1	31,8	mm
24.	Pesul creştăturii la 1/3 din înălţimea dintelui	$t_{1/3}$	30,8	mm
25.	Lăţimea dintelui la 1/3 din înălţimea creştăturii	$b_{1/3}$	14,1	mm
26.	Înălţimea jugului rotor	h_{jr}	87,3	mm
27.	Inducţia în dinte la 1/3 din înălţime	$B_{s1/3}$	0,93	T
28.	Lăţimea polului	b_k	0,170	m
29.	Înălţimea polului	h_p	0,230	m
30.	Secţiunea polului	S_p	$2,34 \cdot 10^{-2}$	m ²
31.	Diametrul exterior al jugului stator	D_{st}	1,315	m
32.	Înălţimea jugului stator	h_{st}	0,075	m
33.	Lăţimea jugului stator	b_{st}	0,170	m

Nr. crt.	Denumirea	Simbol	Valoarea calculată	Unitate de măsură
<u>Reactanțele excitatoarei sincrone</u>				
34.	Reactanța de dispersie a rotorului	x_G	0,06	u.r.
35.	Reactanța de reacție a indușului după axa "d"	x_{sd}	0,897	u.r.
36.	Reactanța de reacție a indușului după axa "q"	x_{sq}	0,53	u.r.
37.	Reactanța sincronă longitudinală	x_d	0,95	u.r.
38.	Reactanța sincronă transversală	x_q	0,59	u.r.
39.	Reactanța de dispersie a înfășurării de excitație	x_{ESES}	0,193	u.r.
40.	Reactanța înfășurării de excitație	x_{ESE}	1,09	u.r.
41.	Reactanța tranzitorie longitudinală	x'_d	0,22	u.r.
42.	Reactanța tranzitorie transversală	x'_q	0,20	u.r.
<u>Înfășurarea de excitație a excitatoarei (calculul variantei optime)</u>				
43.	Numărul de spire pe pol (inițial)	w_{ESE}	256	
44.	Secțiunea conductorului	S_{ESE}	14	cm ²
45.	Rezistența totală a înfășurării de excitație la 75°C	R_{ESE}	2,6	
46.	Rezistența înfășurării de excitație redusă la rotor	R'_{ESE}	$3,74 \cdot 10^{-3}$	u.r.
47.	Constanta de timp a înfășurării de excitație	T_{ESE}	0,92	sec.
48.	Variația tensiunii redresate a excitatoarei în timpul formării de la tensiunea nominală la cea de forțare (figure 5,1)			

Nr. crt.	Denumirea								Simbol	Valoarea calculată	Unitatea de măsură	
	(sec)	t	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5				0,6
(V)	U	100	110,3	127,88	147,94	166,29	180,42	189,8				
49.	Viteza de excitație minimă iugusă									V_{exmin}	1,5	u.r/sec.
50.	Viteza de excitație calculată									V_{ex}	1,62	u.r/sec.
51.	Matricea numărului de spire ei înfășurării de excitație									$N_{ESE}(6,1) = \{200, 220, 240, 260, 280, 300\}$		
52.	Matricea secțiunilor spirei înfășurării de excitație									$S_{ESE}(6,1) = \{10,65; 12; 14; 16,13; 19,45; 21,85\}$		
53.	Numărul de spire ei înfășurării de excitație (varianta optimă)									N_{ESEo}	200	
54.	Rezistența înfășurării exci- tației la 75°C (varianta optimă)									R_{ESE}	2,03	Ω
55.	Rezistența înfășurării de exci- tație optime redusă la rotor									R_{ESE}^r	$4,79 \cdot 10^{-3}$	u.r.
56.	Constanta de timp a înfășu- rării de excitație optime									T_{ESE}	0,72	sec.
57.	Variația tensiunii redresate a excitatoarei în timpul forțării excitației (varianta optimă) figure 5.1.											
	t(sec)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5					
	U(V)	100	112,96	134,07	156,53	175,09	187,54					
58.	Viteza de excitație optimă									V_{exo}	1,915	u.r/sec.
59.	Curentul de excitație la mers în gol									I_{ESEo}	12	A
60.	Curentul de excitație la mers în sarcină									I_{ESEn}	18	A
61.	Densitatea de curent nominală									I_{ESE}^d	1,28	A/cm ²
<u>Pierderile în excitatoarea sincronă</u>												
62.	Pierderile în fier									P_{Fe}	0,64	kW
63.	Pierderile în înfășurarea indusului									P_{SC}	2,28	kW



Nr. crt.	Denumirea	Simbol	Valoarea calculată	Unitate de măsură
64.	Pierderile în înfășurarea de excitație	P_{RHE}	0,845	kW
65.	Pierderile totale	P_{Σ}	4	kW
Instalația de redresare cu diode satelită				
66.	Tipul instalației: punte trifazată cu dublă redresare svind:	n_p	2	diode în punte
67.	Tipul diodei: TU 36 cu polarizare directă și inversă svind:			
	- curentul mediu redresat	I_{PM}	330	A
	- tensiunea inversă de vîrf de lucru	V_{RMI}	1300	V

Nr. crt.	Denumirea	Sim-	Valoarea calculată	Unitatea de măsură
	- tensiune inversă de vîrf repetitivă	$U_{inv.max}$	1500	V
	- tensiune inversă de vîrf de supraîncălzire accidentală	V_{BSM}	1800	V
	- tensiune directă de vîrf	V_{FM}	1,4	V
	- curent invers de vîrf	I_{FM}	6	mA
	- curent direct de vîrf	I_{FM}	5000	A
	- temperatură limită a joncțiunii în funcționare		-55 + 155	°C
68.	Factor de raportizare a curenților în diodele conectate în paralel	K_g	0,8	
69.	Curentul eficient într-o diodă	I_{def}	110	A
70.	Curentul mediu pe diodă în regiunea de forțare	I_g	200	A
71.	Reactanța de comutație a excitatoarei	X_g	0,026	Ω
72.	Unghiul de comutație	α	20	°
73.	Factorul de osculație	K_g	0,67	
74.	Factorul de utilizare	f_g	0,95	
75.	Pierderile totale în redresorul rotativ	P	1,85	kW
76.	Rendamentul excitatoarei sincronice cu diode rotative	η	90	%

Din exemplul considerat rezultă modul de așezare al principalelor valori ale solicitărilor electromagnetice ale acestor excitatoare și anume: solenșia specifică, inducțiile magnetice în diferitele porțiuni ale circuitului magnetic (întrefier, dinți rotor, jug rotor, poli stator și jug stator) densitățile de curent din înfășurarea indușului și inductorului, modul de proiectare optimă a înfășurării inductoare în vederea obținerii vitezei de excitație cât mai mare și modul de dimensionare a instalației de redresare cu diode rotative.

Din tabelul cu valorile calculate se observă că s-au obținut parametri funcționali dorțiți (după prin tema de proiectare) între care: puterea, tensiunea și curentul în regiunea nominală și în regiunea de forțare, factorul de forțare și tensiunii ($K_g=1,8$)

și viteze de excitație ($V_{\text{ex}}=1,5$ u.r./sec.), ceea ce reflectă faptul că metode de proiectare și programul de calcul sînt bune.

5.3. Particularitățile încercării excitatoarelor sincrone cu diode rotative pe standul de probe usinel

Încercarea excitatoarelor sincrone cu diode rotative se efectuează în concordanță cu standardele în vigoare (B 64), completate cu o serie de probe care se realizează separat asupra instalației de redresare cu diode rotative și a excitatoarei sincrone.

Diodele ce se vor monta în paralel și pe același braț al punții, se vor încadra după căderea de tensiune în mai multe clase și cu ajutorul șnururilor conectate în circuitele diodelor legate în paralel se va controla repartiția curenților pe diode, admitînd abateri de cel mult $\pm 10\%$. Pierderile din redresor se determină scăzînd din puterea absorbită, puterea obținută redresată. Probele excitatoarei sincrone cu redresor cu diode rotative se efectuează cu mașina asamblată și montată pe instalația de încercare pe standul de probă (figure 5.2). La conceperea "instalației de încercare" pe standul de probă usinel se contribuie direct și au avut în vedere în special faptul, că o parte dintre elementele instalației să fie reutilizate (inle de contact și suportii perii, scuturi portlagăr, etc.) la un număr cit mai mare de mașini diferite ca tipodimensiuni.

Instalația de încercare pe standul de probă constă în principel dintr-un arbore suport, pe care se fixează rotorul excitatoarei cu diode rotative și cele două grupuri de inle de contact; primul grup format din inle dimensionate pentru curentul redresat (de sarcină) al excitatoarei și al doilea grup format din mai multe inle mai pentru măsurarea tensiunii de fază, respectiv simularea întresuperii sau scurtcircuitării unor diode din instalația de redresare rotativă. Statorul excitatoarei se fixează în două scuturi portlagăr, care prind sarcinile arborelui prin intermediul unor lagăre cu rulmenți. Pe un capăt al arborelui se fixează o flanșă, care prin mișcarea de la un motor de antrenare de c.c., cu posibilități largi de variație a turației, prin intermediul unui cuplaj elastic.

Pe inlele care colectează tensiunea redresorului rotativ se fixează cablurile de legătură spre inlele de contact, iar pe

bazele de conexiune ale fazelor excitatoarei spre redresoarele redresorului rotativ se fixează conductorii care dau scunalele la grupul de inele mici de contact, așa cum se observă în figura 5.2.

În vederea efectuării probelor se realizează schema de legături pentru încercarea pe stand a excitatoarelor sincrone cu diode rotative, arătate în figura 5.3. Această conține excitatoarea cu diode rotative (1,2), inelele de contact (3,4), reostatul de excitație (12), prevăzut cu un contactor pentru realizarea forțării excitației (13) și rezistențe de demersitate rapidă (11), introdusă în circuitul de excitație cu ajutorul suportului de curent continuu (10) și dispozitivul de supraveghere al diodelor (8) din redresorul rotativ, precum și instrumentele de măsurare a tensiunii și curentului de excitație al excitatoarei, a tensiunii și curentului de fază și a tensiunii și curentului redresat. Alimentația infășurării de excitație a excitatoarei se realizează de la un redresor monofazat (14) (la excitație separată a excitatoarei), iar redresorul rotativ la funcționarea în sarcină, debitează pe o rezistență de sarcină (6), care se introduce prin intermediul unui contactor (5).

Având schema de legături realizată, și după efectuarea unor probe preliminare ca: măsurarea rezistențelor de izolație și a rezistențelor ohmice ale infășurărilor, a rigidității dielectrice, se trece la ridicarea caracteristicii de mers în gol cu generator și de asemenea a caracteristicii în scurtcircuit. Pentru ridicarea caracteristicii de mers în sarcină excitatoarea va debita pe o rezistență constantă, evind valoarea rezistenței infășurării de excitație a generatorului principal la temperatura de funcționare. Această rezistență de sarcină trebuie să suporte curentul nominal al excitatoarei în regim permanent și de două ori acest curent timp de 1 minut.

Forțarea excitației se realizează prin scurtcircuitarea tuturor rezistențelor din circuitul de excitație al excitatoarei, cașine funcționând la tensiunea nominală. Se înregistrează prin oscilografie tensiunea și curentul redresat, timpul și curentul de excitație al excitatoarei. Scurtcircuitarea rezistențelor din circuitul de excitație al excitatoarei durează până la stingerea tensiunii plafon, stabilindu-se experimental plafonul de forțare și timpul necesar. Din oscilograma tensiunii redresate executată la această probă, în care apare variația tensiunii până la obți-

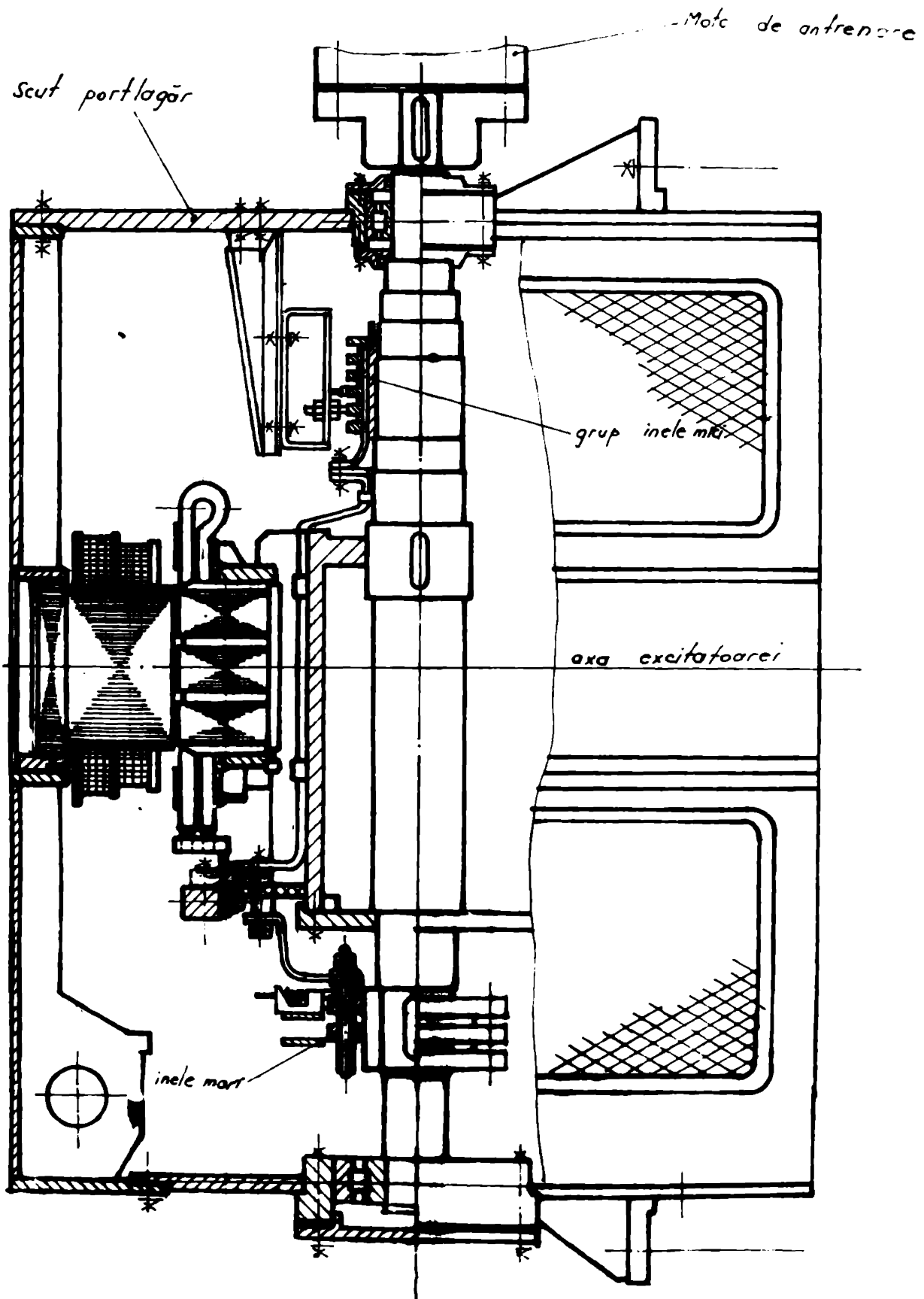


Fig. 12 Instalajia de incercare a excitatoarei sincrone cu diode rotative

maree tensiunii de forțare și timpul în secunde se stabilește viteza de excitație conform relațiilor (77, 79) și figurii 3.3:

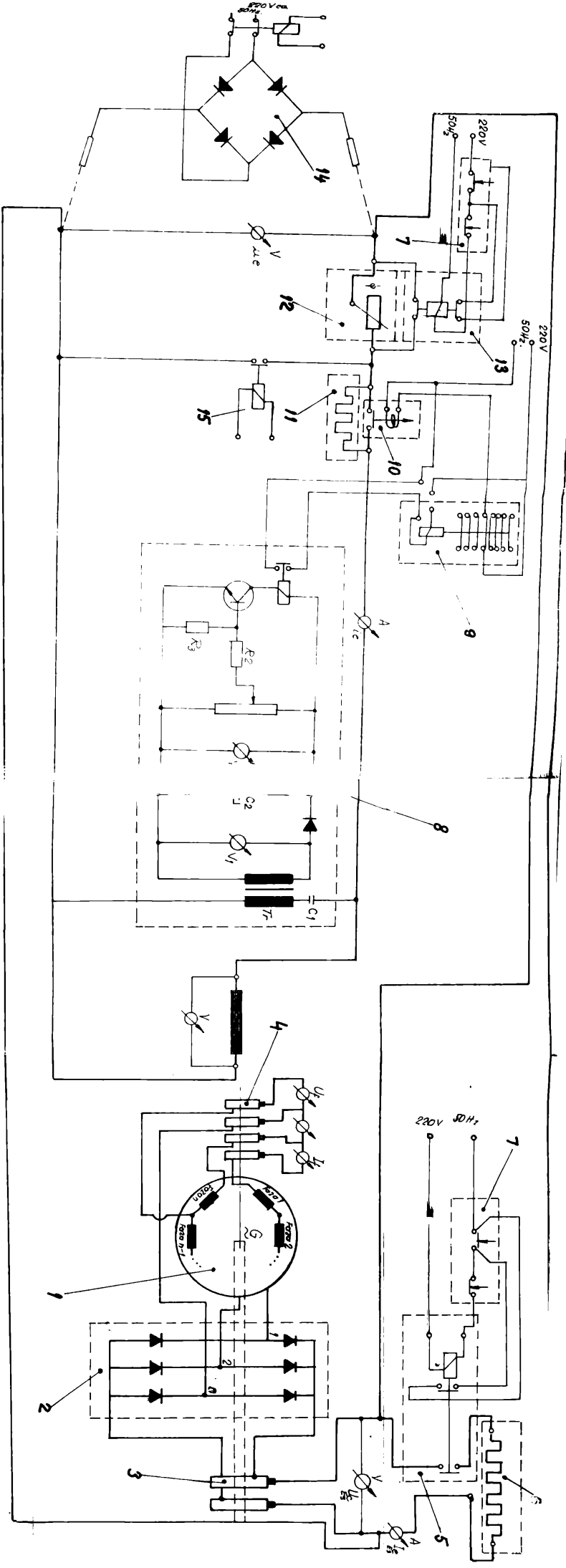
Verificarea redresorului rotativ cu diode la supraexcitația de scurtă durată se realizează cu mașina în regim de scurtcircuit, dispozitivul de scurtcircuitare montându-se pe partea curentului redresat. Curentul de supraexcitație se alege de obicei de două ori curentul nominal de excitație al generatorului principal și se limitează în timp la aproximativ 30 sec.

Probe de deexcitare rapidă a excitatoarei se realizează cu mașina funcționând în sarcină și la tensiunea nominală. Cu ruperea de curent continuu (scheme de legături) se întrerupe circuitul de excitație al excitatoarei, conectând totodată rezistența de deexcitare rapidă a excitatoarei în circuit. Se oscilografiază tensiunea redresată a excitatoarei și timpul de stingere al tensiunii.

O serie de probe se fac pentru verificarea funcționării dispozitivului de supraveghere a diodelor pentru cele două cazuri mai frecvent întâlnite și anume: diodă întreruptă și diodă scurtcircuitată. Astfel, cazul diodei întrerupte se realizează cu mașina oprită, deconectând o diodă, după care mașina se pornește neexcitată, iar după stingerea turșției nominale se va încărea excitatoarea cu o sarcină de aproximativ $1/4$ din cea nominală, urmând seșionarea dispozitivului de supraveghere al diodelor. Pentru a simula cazul diodei scurtcircuitate, se va scurtcircuita o diodă din redresorul rotativ, procedând apoi similar ca în cazul precedent observând seșionarea dispozitivului de supraveghere a diodelor.

Pentru aprecierea tensiunii redresate se oscilografiază forma curbei tensiunii redresate la masa în gol și la masa în sarcină a excitatoarei, pentru diverse valori ale sarcinii, începând de la $1/4$, până la sarcină nominală.

Încercarea prototipurilor de excitatoare sincronă cu diode rotative pe standul uzinei se finalizează cu o probă de încălzire prin care se determină temperaturile stabilizate pentru principalele părți ale mașinii și anume: înfășurarea de excitație, înfășurarea rotorică și redresorul rotativ cu diode.



Schemă instalației de încercare pe statorul de probă uzinală a excita-toarelor sincrone cu diode rotative

1. Excitațoare sincrone polifazate
2. Redresor cu diode rotative
3. Jucle de contact mari (pt. curent continuu)
4. Jucle de contact mici (pt. măriri de forță)
6. Rezistență de sarcină (echivalentă cu rezistența rotorului a generatorului principal)
7. Buton dublu de acționare
8. Dispozitiv de supraveghere a diodelor
9. Releu intermediar
10. Ruptor de curent continuu
11. Rezistență de dezexcitare rapidă a excitațoarei
12. Reostat de excitație
13. Contactator de curent continuu
14. Redresor mono-fazat
15. Contactator pentru dezexcitare

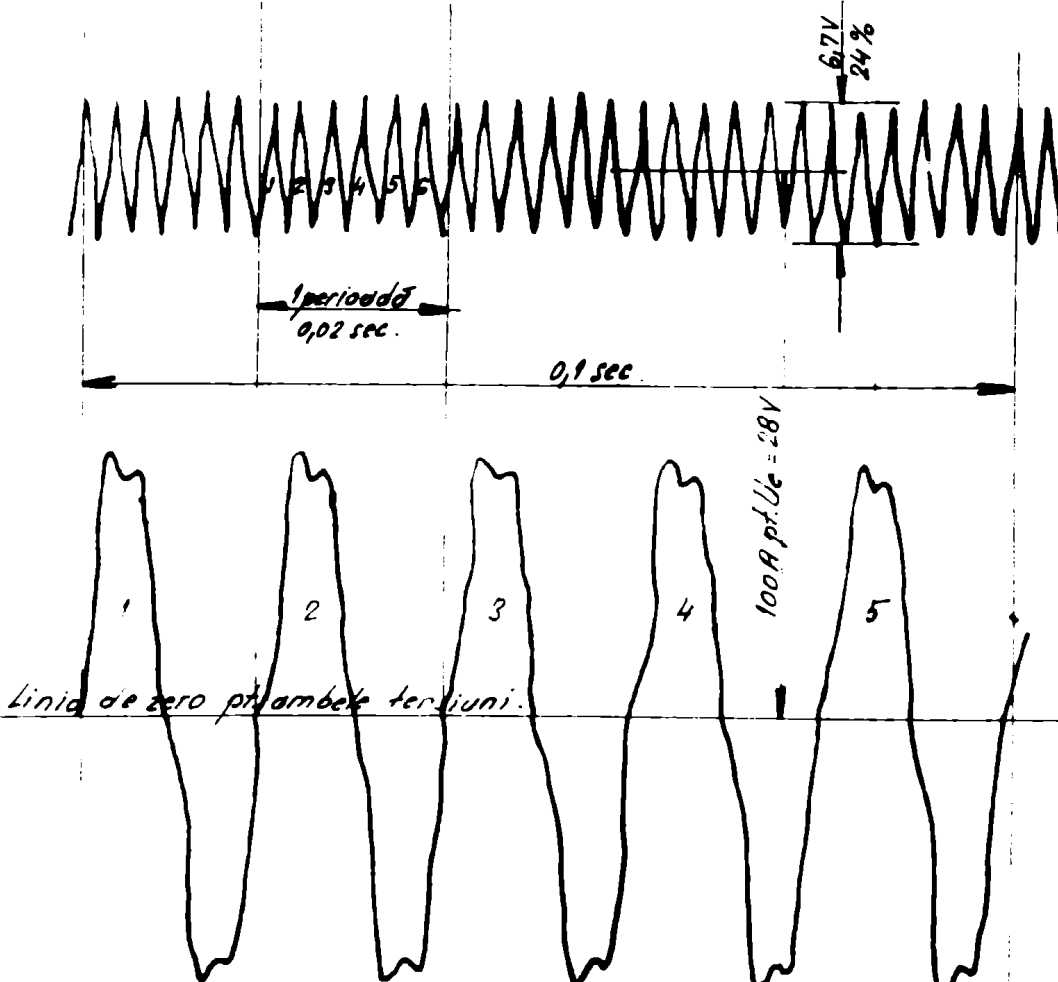
Fig. 5.3

5.4. Rezultatele experimentale obținute cu excitatoarea sincronă cu diode rotative proiectată

În vederea verificării metodei de proiectare a excitatoarelor sincronice cu diode rotative și a preciziei algoritmului de calcul utilizat s-au măsurat o serie de mărimi importante, pentru buna funcționare a sistemului de excitație, atât pe standul de probă șinșii, cât și în centrale hidroelectrice. Sînt reduse încrederea și rezultatele experimentale obținute cu mașina proiectată.

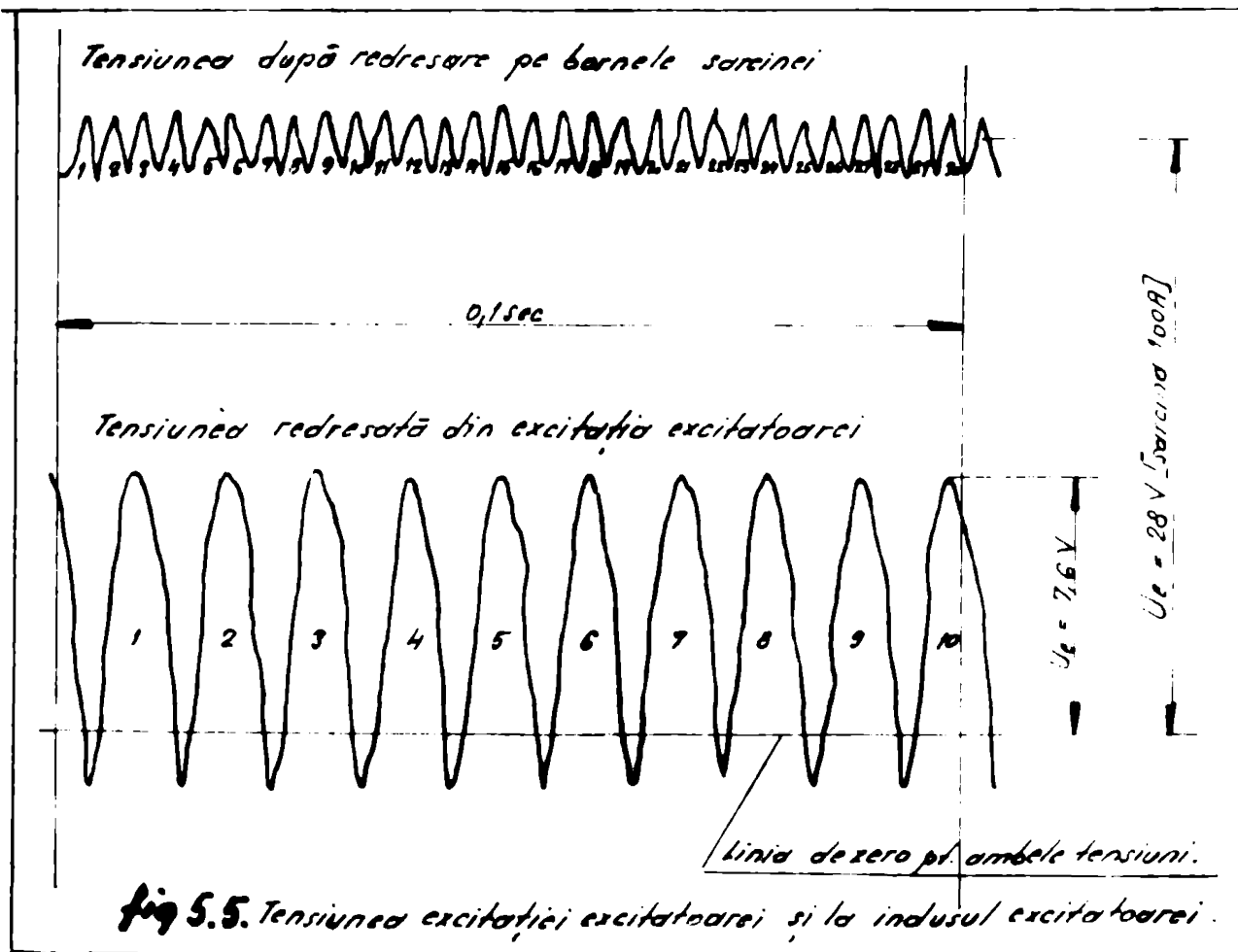
Principalele rezultate ale calculului prezentate pentru excitatoarea sincronă cu diode rotative (§ 5.2.) se compară în continuare cu datele experimentale obținute cu această mașină la încercarea în uzină producătoare și în centrale hidroelectrice de la Greble-Regiș, unde se află de mai mult timp în funcțiune.

fig. 5.4. Tensiunea excitatoarei în fața redresorului și după redresor.



Pe etendul de probă usinel s-au urmărit aspectul tensiunii induse în excitatoarea sincronă înainte redresorului și după redresorul rotativ, măsurile înregistrate în oscilograma din figura 5.4, fiind: tensiunea redresată - 28 V; tensiunea alternativă pe fază - 12 V, curentul de sarcină a excitatoarei pe o rezistență obișnuită - 100 A și ondulația tensiunii redresate măsurate - 300 cm/sec .

În figura 5.5, se prezintă tensiunea redresată a excitatoarei la bornele unei sarcini obișnuite și tensiunea redresată în circuitul de excitație al excitatoarei. Măsurile înregistrate sînt: tensiunea medie redresată după redresorul rotativ - 28 V, tensiunea de vîrf a excitației excitatoarei - 7,6 V, ondulația tensiunii excitatoarei - 300 cm/sec , ondulația tensiunii de excitație a excitatoarei - 100 cm/sec .



Din oscilogrammele din figurile 5.4, 5.5 se constată că forma tensiunii alternative de fază a excitatoarei sincrone este cvasisinusoidală, iar tensiunea redresată obținută după redresorul rotativ cu diode, deși prezintă ondulații nu are influență asupra

tensiunii la bornele generatorului principal, neapărând armoniei suplimentare.

Precisăm că valorile măsurate corespund unei încălziri de aproximativ 1/4 din sarcina nominală a excitatoarei și prin urmare diferă de mărimile nominale prezentate în rezultatele calculului de proiectare (§ 3.2.). Încercarea excitatoarei sincrone cu diode rotative s-a realizat la o sarcină mai mică decât cea nominală, deoarece motorul de antrenare disponibil nu a avut putere suficientă pentru a putea încălzi excitatoarea la sarcină nominală. Dar aceste cărimi măsurate concordă cu mici diferențe cu rezultatele din calculul de proiectare pentru 1/4 din sarcina nominală a excitatoarei sincrone cu diode rotative.

Pe standul de probă s-au simulat cazurile de întrerupere ale diodelor din redresorul rotativ, respectiv de scurtcircuțare, iar modificările care se produc sînt reduse în oscilogramele din figure 5.6. și sintetizate în tabelul VI.

Tabel VI

Situație redresorului	Tensiunea la bornele hidrogeneratorului	Tensiunea de excitație a hidrogeneratorului	Tensiunea la bornele înfășurării de excitație a excitatoarei	Tensiunea la bornele dispozitivului de protecție și control
KV	Aspectul V	Aspectul V	Aspectul V	Aspectul
Funcționare normală 6,1	Alternativ sinusoidal 23,5	Tensiunea redresată cu undulă de 300 Hz. 10,5	Tensiunea redresată monofazică 16,5	Tensiunea alternativă cu amplitudini egale 2-100 Hz.
1 diodă scurtcircuitată 0	- 3,9	Tensiunea cu o semi-sinusoidă pe perioadă 4,2	Tensiunea alternativă f=30 Hz, 16,5	Tensiune pronunțat alternativă.
2 diode elibersate întrerupte 5,25	Alternativ sinusoidal 24	Cu 2x2 dinți de fierăstrău și o pauză în timpul unei perioade. 11	Tensiunea redresată cu supra-punerea unei componente de tensiune alternativă 16,5	Tensiunea alternativă cu amplitudini egale cu f=30 Hz.

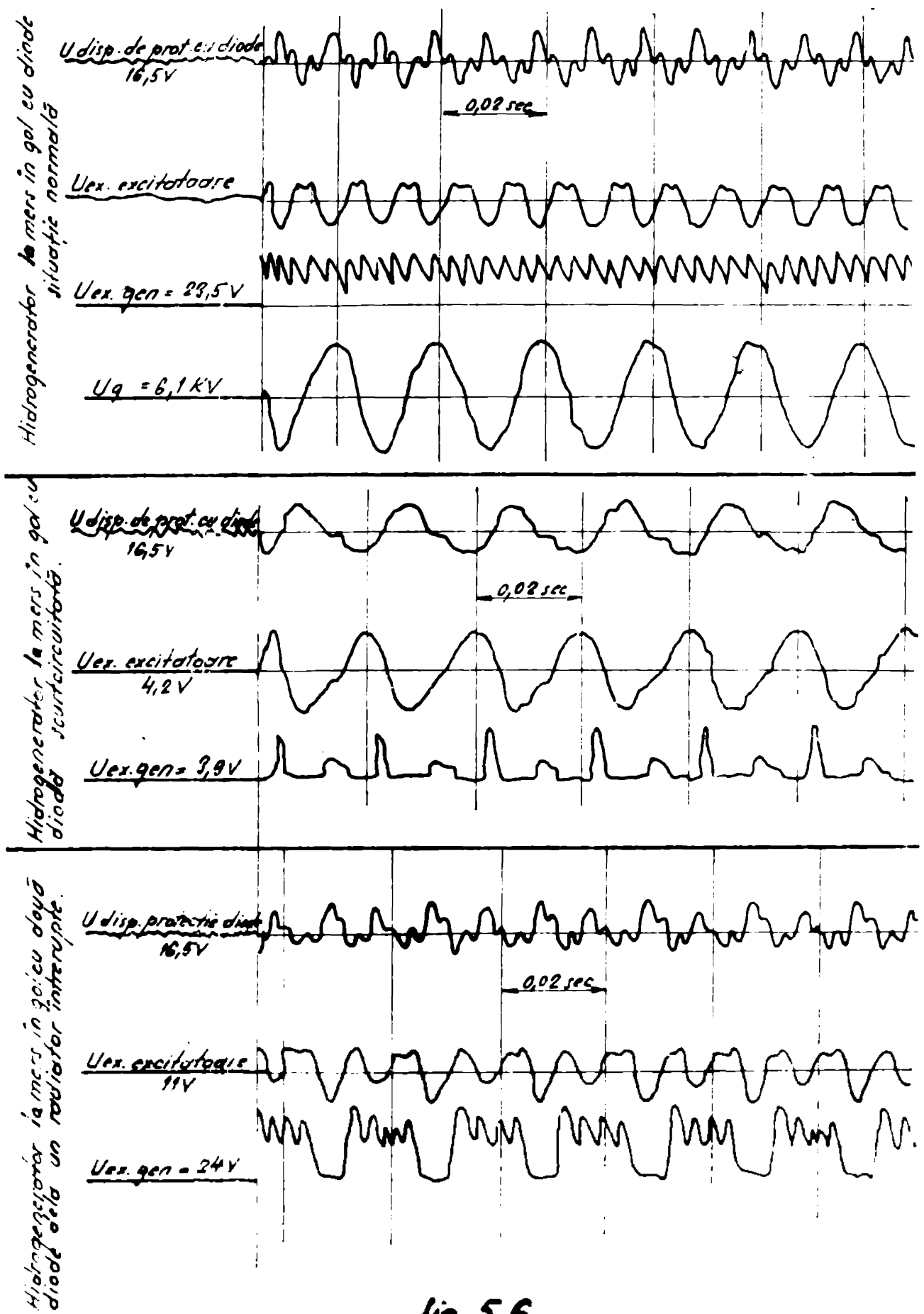
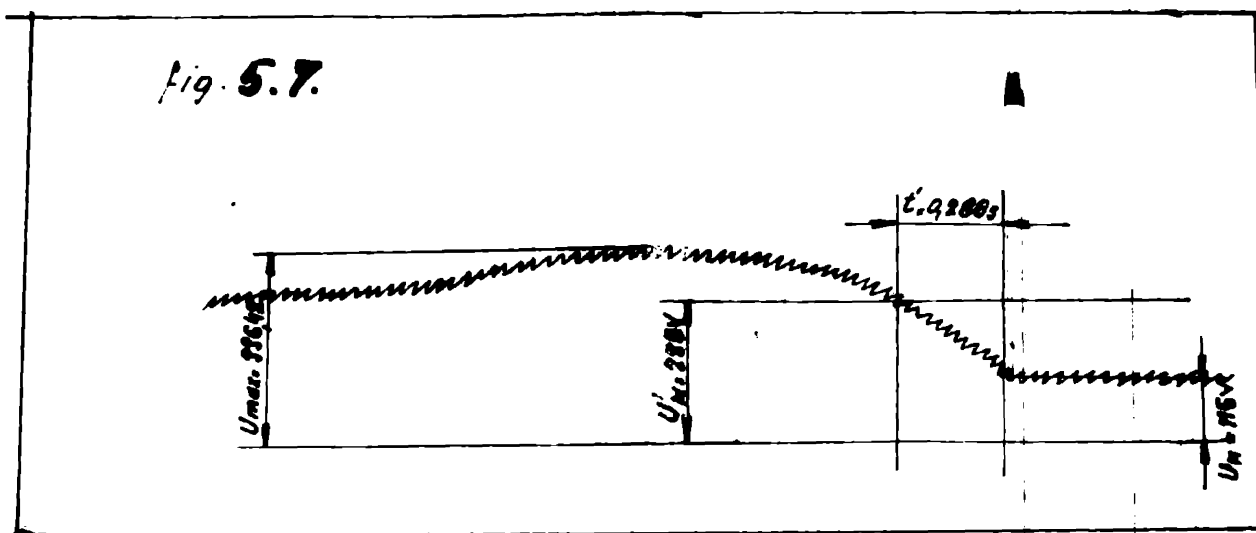


fig. 5.6.

Din măsurătorile prezentate în figura 5.6. și tabelul VI se observă că în cazul defectării unei diode din redresorul rotativ se induce o tensiune în înfășurarea de excitație a excitatoarei, tensiune care stă la baza realizării unui dispozitiv electronic de supraveghere și semnalizare a diodelor defecte din redresorul rotativ.

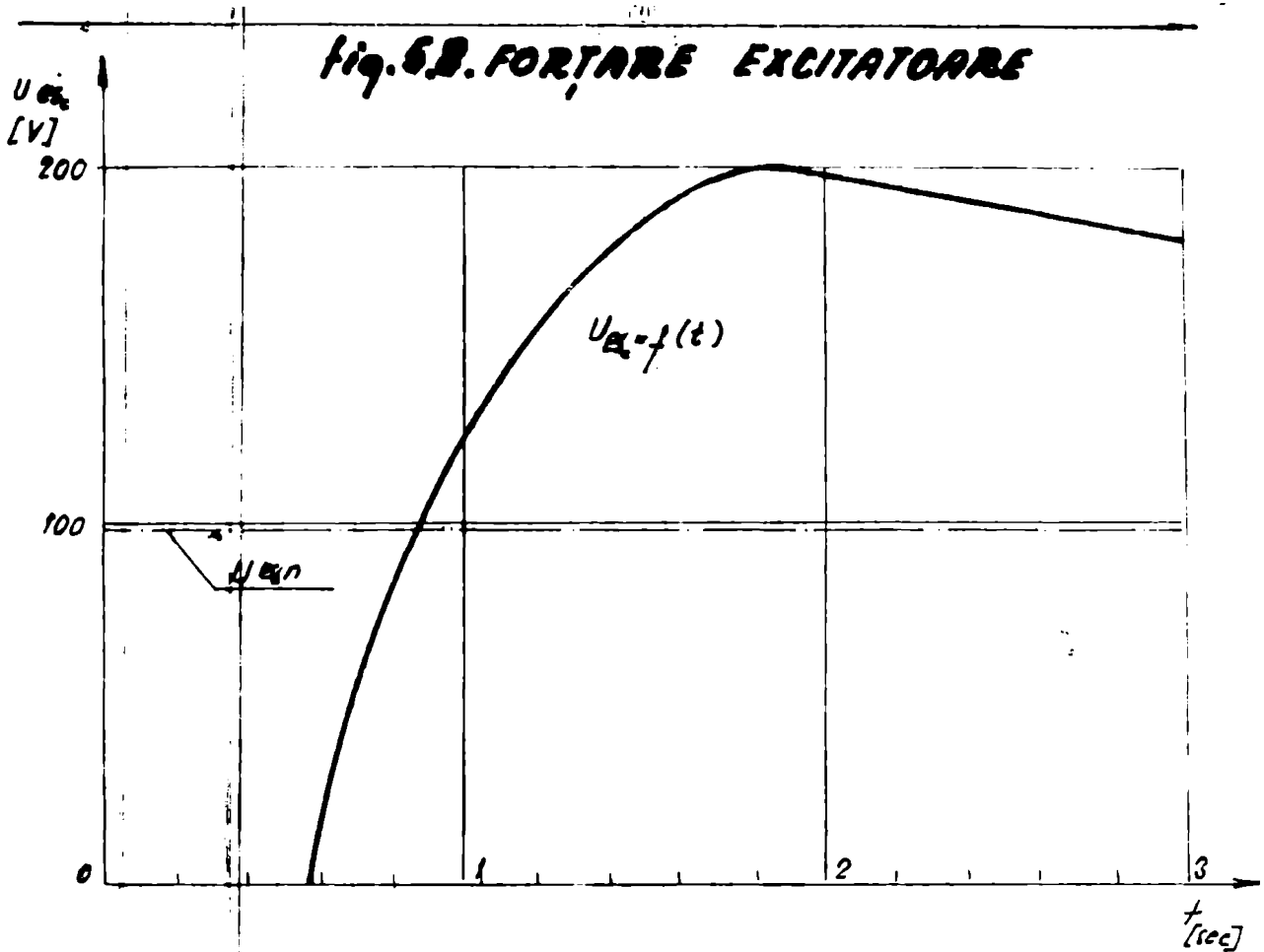
Tot la încercările uzinale s-a efectuat forțarea excitației prin scurtcircuitarea tuturor rezistențelor din circuitul de excitație al excitatoarei și s-a oscilografiat tensiunea redresată cu excitatoarea funcționând în gol și care are aspectul din figura 5.7.



Forțarea excitatoarei s-a efectuat apoi cu hidrogenatorul legat în scurtcircuit, prin scurtcircuitarea tuturor rezistențelor din circuitul de excitație al excitatoarei. Valorile obținute sînt reduse în figura 5.8, iar viteza de excitație determinată este $V_{ex} = 1,84$ u.c./sec. apropiată de valoarea vitezei de excitație calculată $V_{ex0} = 1,919$ u.c./sec.

Deexcitarea rapidă se realizează prin deconectarea bruscă a curentului de excitație al excitatoarei, și conectarea pe o rezistență de deexcitare, generatorul fiind excitat și mergînd în gol la tensiunea și frecvența nominală.

Valorile obținute în cursul procesului de deexcitare al hidrogenatorului sînt reduse în tabelul VII.



Datele forțării:

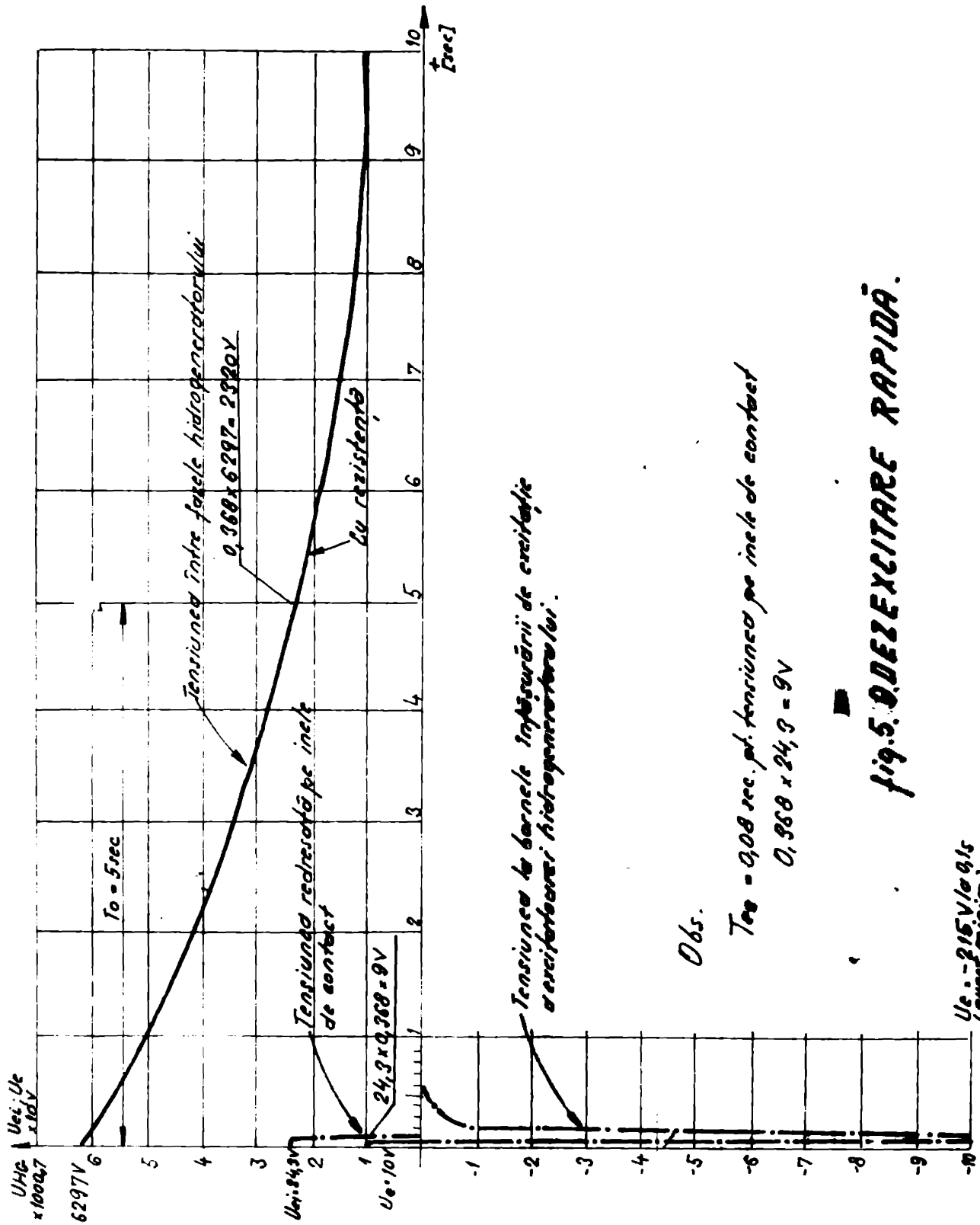
$U_{exn} = 99V$

$U_{ex\ max} = 200V$

$K_{forțare} = 2,02$

Tabelul VII

Denumirea înfășurării la care s-a făcut înregistrarea	Sim-	U _{em}	Valoarea înregistrată în V ₁		Timpul în sec.	
			la pcr-nise	dupa T _{op} resp. T _{ES} (sec)	T _{op} resp. T _{ES} (s)	Până la stingerea completă
1	2	3	4	5	6	7
Tensiunea la bornele A-B a înfășurării statorice	U _{MS}	V	6297	2320 ^x	5	10
Tensiunea la inelele de contact a înfăș. în excitație a EI.	U _{RS}	V	24,3	9	0,08	0,15



Obs.

$T_{00} = 9,08 \text{ sec. pt. tensiunea pe inel de contact}$
 $0,368 \times 24,3 = 9V$

fig. 5. O.D.E.Z.E.X.C.I.T.A.R.E R.A.P.I.D.Ă.

$U_e = -215V / 0,915$
 (punct minim)

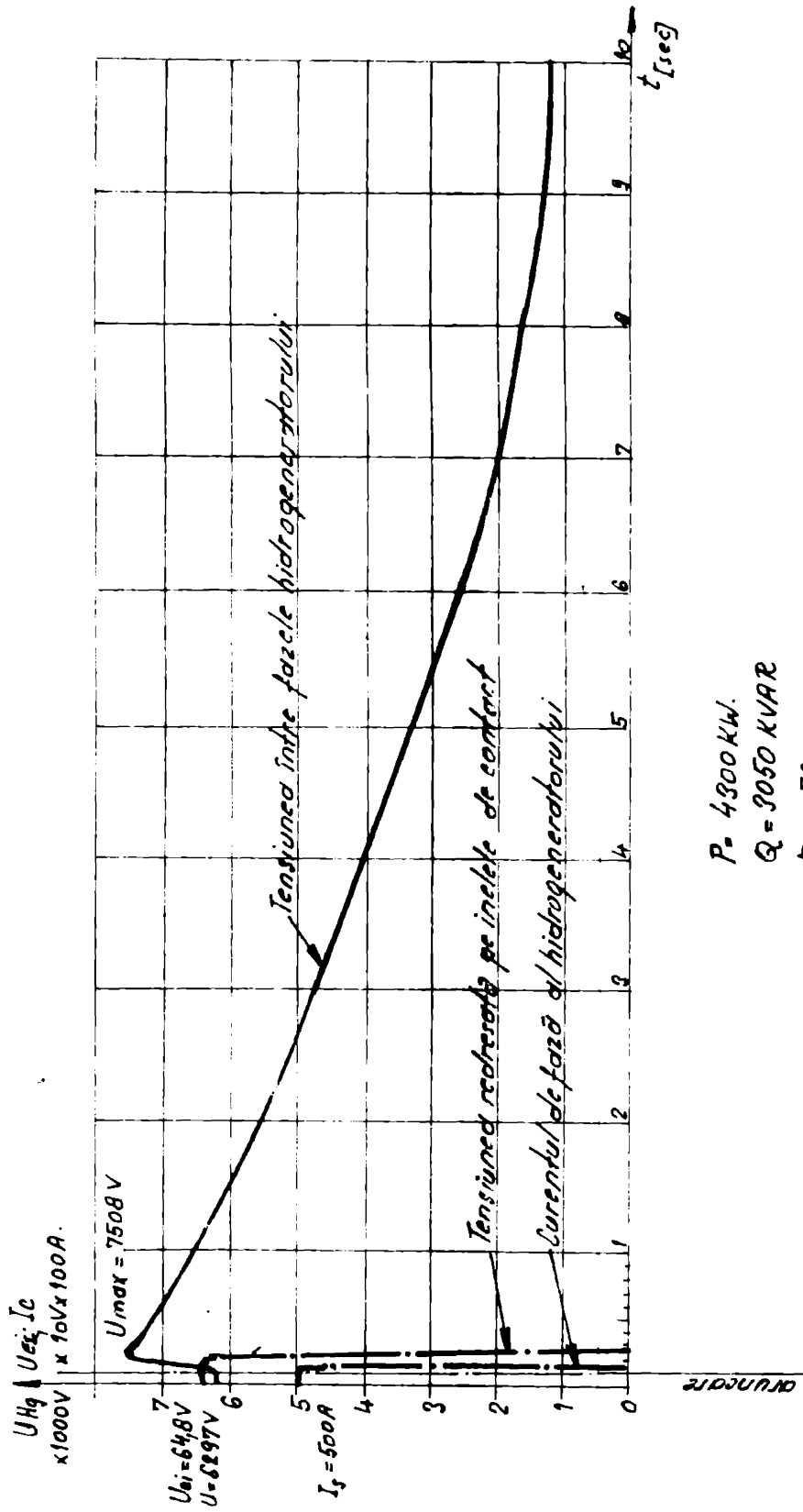
	1	2	3	4	5	6	7
Tensiunea la bornele infășurării de excitație a excitatoarei		U_{BSE}	V	K	-	-	0,5

Se observă că valoarea de 2230 V reprezintă 0,368 din tensiunea inițială la bornele A-B a infășurării statice a hidrogenatorului, iar timpul necesar pentru stingerea acestei valori reprezintă cu aproximație constanta de timp a infășurării de excitație a hidrogenatorului cu inductor deschis cu infășurarea rotorică conectată în circuitul excitatoarei. De asemenea, se precizează că T_{op} este timpul în care tensiunea la bornele generatorului ajunge la valoarea de 0,368 din tensiunea nominală; T_{85} este timpul în care tensiunea la rotorul hidrogenatorului atinge 0,368 din valoarea inițială. Din analiza oscilogramelor din figura 5.9 rezultă că deexcitarea hidrogenatorului se face prin întreruperea circuitului de excitație al excitatoarei cu un contactor și introducerea rezistenței de deexcitare a excitatoarei. De aceea nu s-a sperat la apariția supra-tensiunii în circuitul de excitație al hidrogenatorului care ar solicita izolajul infășurării rotorice. Tensiunea din circuitul de excitație al hidrogenatorului se stinge relativ repede, în 0,18 sec. fiind tensiunea la bornele hidrogenatorului ajunge numai după 5 sec. la valoarea de 0,368 U_n .

Comparând aceste constante de timp în cursul deexcitării cu cele măsurate la hidrogenatoare de puteri apropiate și echipate cu sisteme de excitație cu excitatoare de curent continuu, respectiv sisteme de excitație statice, prevăzute cu autoaste de stingere a cimpului și rezistențe de deexcitare ale hidrogenatorului, se constată că, timpul de deexcitare se reduce cu atât mai mult cu cât valoarea rezistenței intercalate, în circuitul rotoric al generatorului principal este mai mare. Ca rezultat, pot apărea pe infășurarea de excitație a hidrogenatorului supra-tensiuni, care pot atinge de 10-15 ori valoarea tensiunii nominale de excitație, periclitând în unele cazuri izolajul infășurării rotorice.

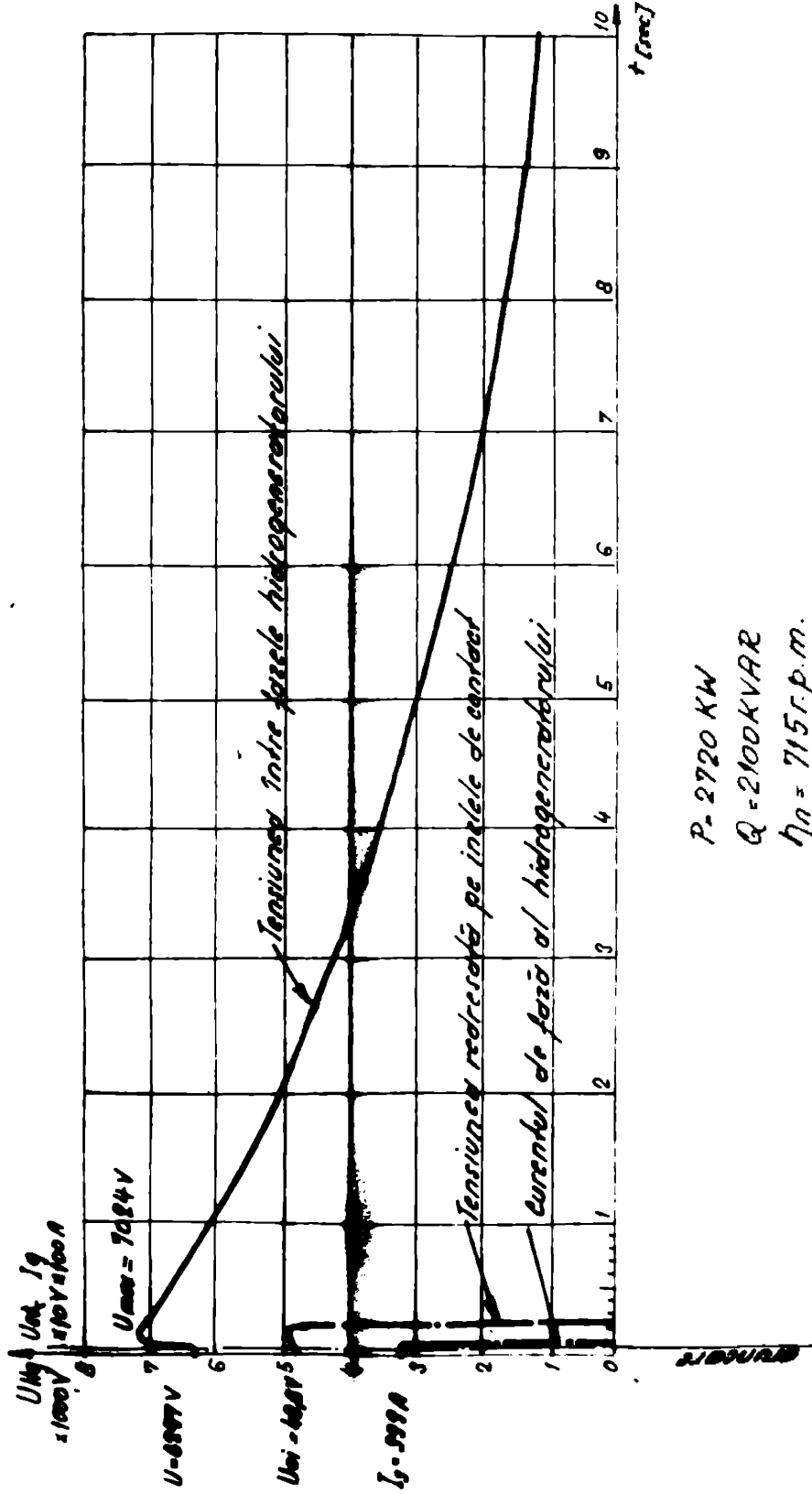
Că altă serie de încercări efectuate au fost deconectările de sarcină, hidrogenatorul fiind cuplat la rețea și precedat la deconectarea bruscă a sarcinii, cu oprirea hidrogenatorului prin întrerupătorul principal și deexcitarea sa. În tabelul VIII se redau valorile obținute în cursul deconectărilor de sarcină ale

Fig. 5.10. DECONECTARE DE SARCINĂ



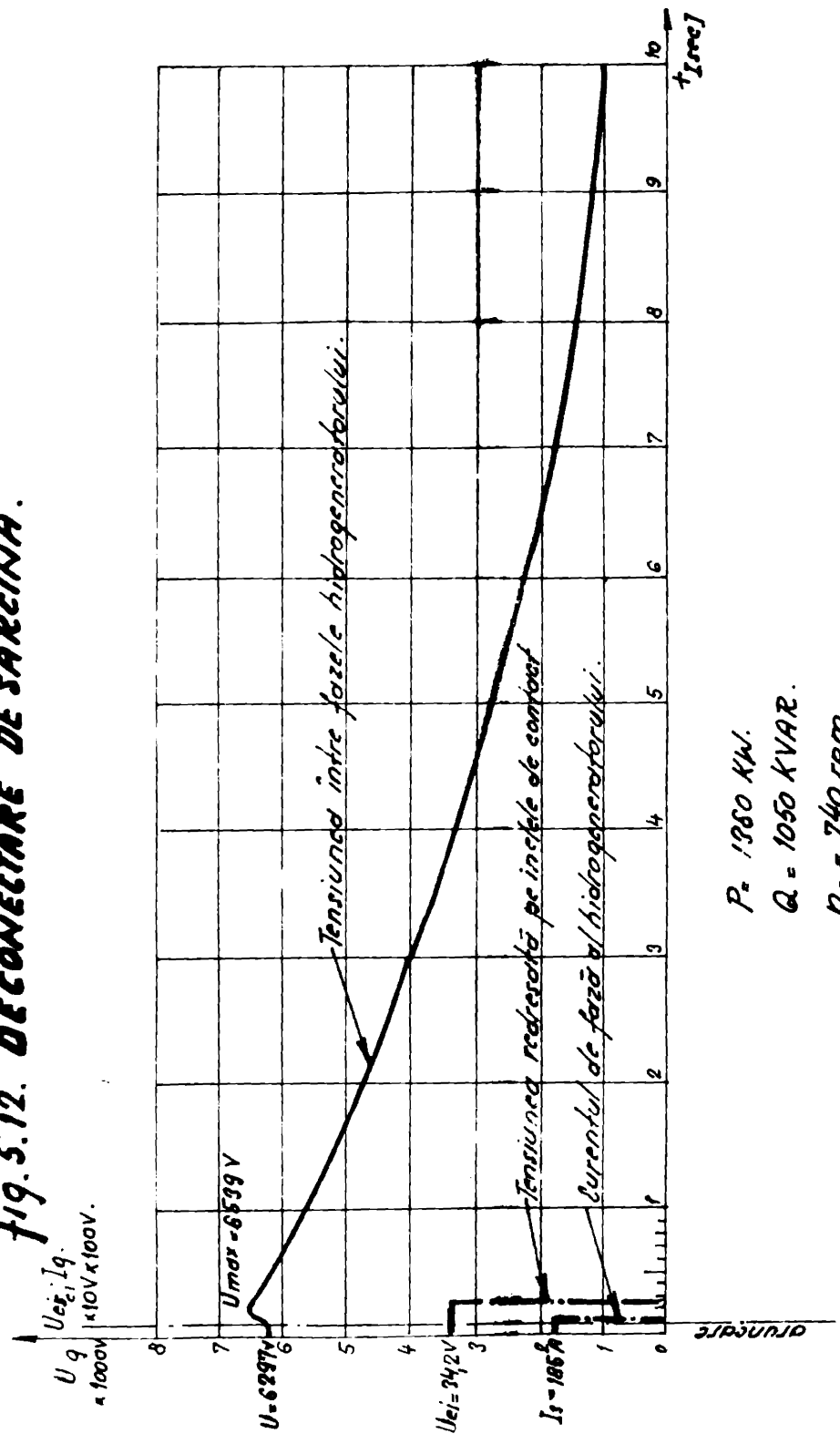
$P = 4300 \text{ kW}$
 $Q = 3050 \text{ kVAR}$
 $\eta_n = 720 \text{ rpm}$
 $\eta_{\max} = 1020 \text{ r.p.m.}$
 $\Delta U = 19,7\%$
 $\Delta n = 39,3\%$

Fig. 5.11. RECONECTARE DE SARCINA



$P = 2720$ KW
 $Q = 2100$ KVAR
 $\eta_n = 7157$ p.m.
 $I_{max} = 865$ p.m.
 $\Delta U = 12\%$
 $\Delta n = 21\%$

fig. 5.12. DECONNECTARE DE SARCINA.



$P = 1960 \text{ KW.}$
 $Q = 1050 \text{ KVAR.}$
 $n = 740 \text{ rpm.}$
 $n_{max} = 800 \text{ rpm.}$
 $\Delta U = 4\%$
 $\Delta n = 8,3\%$

hidrogeneratorului cu funcționare în regim manual de excitație.

Se precizează că deconectările s-au făcut fără regulator automat de turție și regulator automat de tensiune.

Tabelul VIII

Nr. est.	Nr. probei	Valori înregistrate Simbol	UM	La por- nire	Val. max.	La stin- gere	Timp de stin- gere	U %	n %	Dis- gre- na
1. Probe nr.1		P	KW	4300	0	0				5.10
		Q	KVAR	3050	0	0				
		U _G	V	6297	7908	1200	10 sec	19.8		
		I _{EN}	A	500	0	0				
		U _{EN}	V	64	70	6	0,1 sec			
		n	rpm	720	1020				37,3	
2. Probe nr.2		P	KW	2720	0	0				5.11
		Q	KVAR	2100	0	0				
		U _G	V	6297	7024		10 sec	12		
		I _{EN}	A	333	0	0				
		U _{EN}	V	48,6	49,5		0,15 sec			
		n	rpm	215	865				21	
3. Probe nr.3		P	KW	1360	0	0				5.12
		Q	KVAR	1050	0	0				
		U _G	V	6297	6939	1100	10	4		
		I _G	A	185	0	0				
		U _{EN}	V	34,2	35	0				
		n	rpm	360	800				8,3	

Obs.-n - turția generatorului citită pe tahometru.

Din analiza măsurătorilor efectuate (Tabelul VIII) se observă că, în cazul deconectării bruste a sarcinii hidrogeneratorului se produce o creștere mică a tensiunii de excitație a generatorului și o scădere mai pronunțată a tensiunii la bornele generatorului, dar aceste variații nu periclitează izolația înfășurărilor sarcinii și nici diodele din redresorul rotativ.

Comportarea hidrogeneratorului conectat la regulatorul automat de tensiune se reflectă în menținerea constantă a tensiunii la bornele generatorului, în urma variațiilor de sarcină.

Menținerea constantă a tensiunii la bornele generatorului depinde de turția agregatului, de masele inerțiale în mișcare (constante de timp mecanică), precum și de constantele de timp electrodinamice ale ansamblului generator-excitator. Constante de timp mecanică este determinată pentru regulatorul de turție căruia i

se impun stateri de turajie, respectiv frecvență ega de mici, încît practic nu pot influența valoarea tensiunii la borne.

Performanțele propriu-zise ale sistemului de reglare sînt evidențiate de mărimea amplitudinii și a frecvențelor perturbatoare ce pot apărea la intrarea regulatorului de tensiune și să determine, de astfel de variație la ieșirea lui, încît aceste variații, să nu se poată evidenția în mărimea reglată. În cazul nostru mărimea de ieșire a regulatorului este tensiunea ce se aplică bobinajului de excitație al excitatoarei și determină tensiunea de excitație a hidrogenatorului și prin aceasta tensiunea la bornele acestuia.

Încercările efectuate cu generatorul excitat și cuplat la rețea, dar fără sarcină sînt redată în figurile 5.13...5.18.

În figura 5.13 se observă că, fără a modifica tensiunea de comandă U_g , nu se înregistrează nici o variație a tensiunii la bornele generatorului U_{HG} . În cazul cînd tensiunea de comandă cade brusc la zero și tensiunea de excitație a generatorului scade brusc la zero, iar tensiunea la borne scade la zero după o curbă, ce depinde de constante electromagnetice a generatorului.

Tot în această figură se vede modul cum crește tensiunea la bornele generatorului pînă la valoarea nominală, cînd această variație este comandată de regulator. Figurile 5.14, 5.15 redau încercările ce s-au făcut pentru a determina, mărimea amplitudinii semnalului perturbator la ieșirea regulatorului (U_g), menținînd constantă frecvența lui; amplitudine care să determine o variație sensibilă în mărimea reglată, în cazul acestei U_{HG} . Din cele două figuri se observă că, la o triplare a amplitudinii semnalului perturbator (figura 5.15a), în tensiune, practic nu se observă nici o variație sensibilă. Din figura 5.16 se evidențiază că, nici o variație monotonă a amplitudinii semnalului de comandă U_g al regulatorului, nu determină variații sensibile în tensiunea la borne.

În figura 5.17 s-a mărit frecvența semnalului perturbator față de figura 5.16a și totodată s-a variat în subele sensului vitezei amplitudinii. Și în acest caz în tensiunea la borne nu apare nici o variație sensibilă.

În figura 5.18 se analizează același fenomen, în cazul cînd frecvența semnalului perturbator se micșorează față de cel, din figura 5.17 și totodată se modifică și amplitudinea lui. Și în acest caz variațiile în tensiunea la borne sînt puncte neglijabile.

Încercările de deconectări bruște de sarcini efectuate în regimul de funcționare cu regulator automat de tensiune au evidențiat

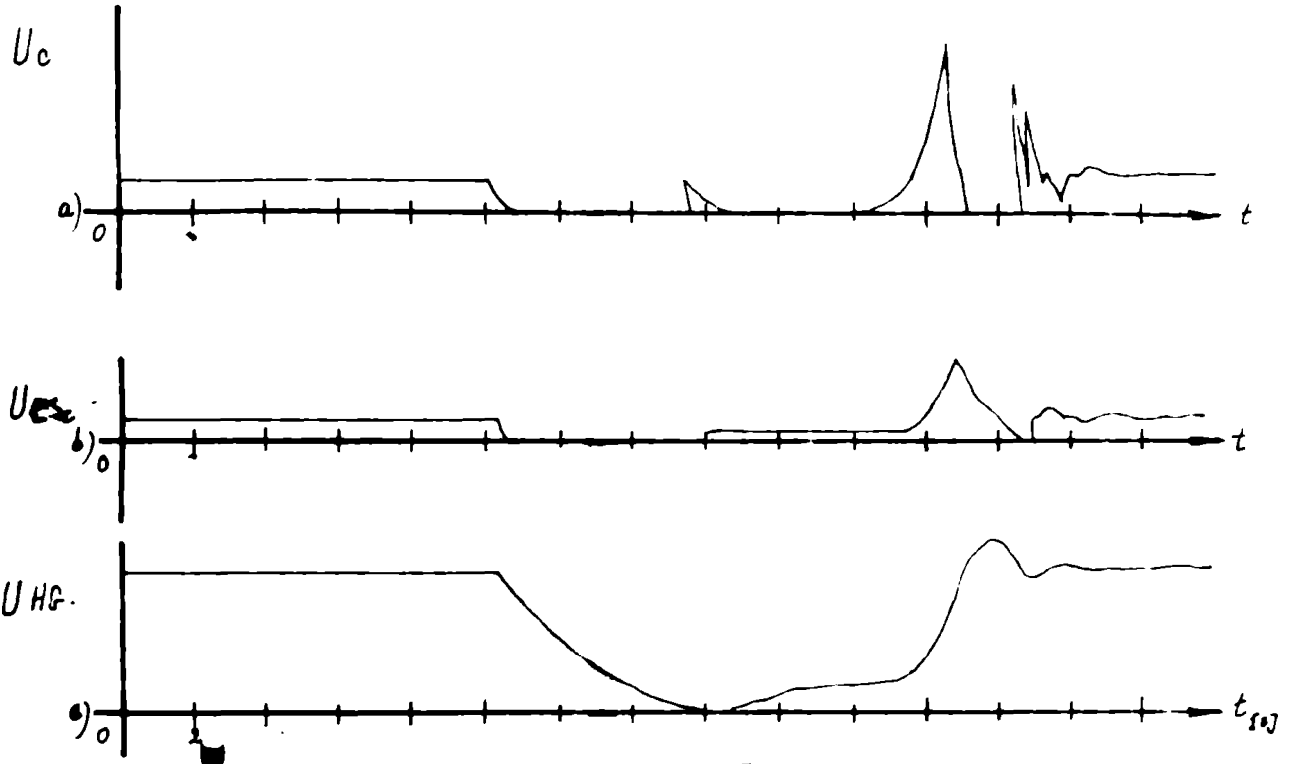


fig. 5.13.

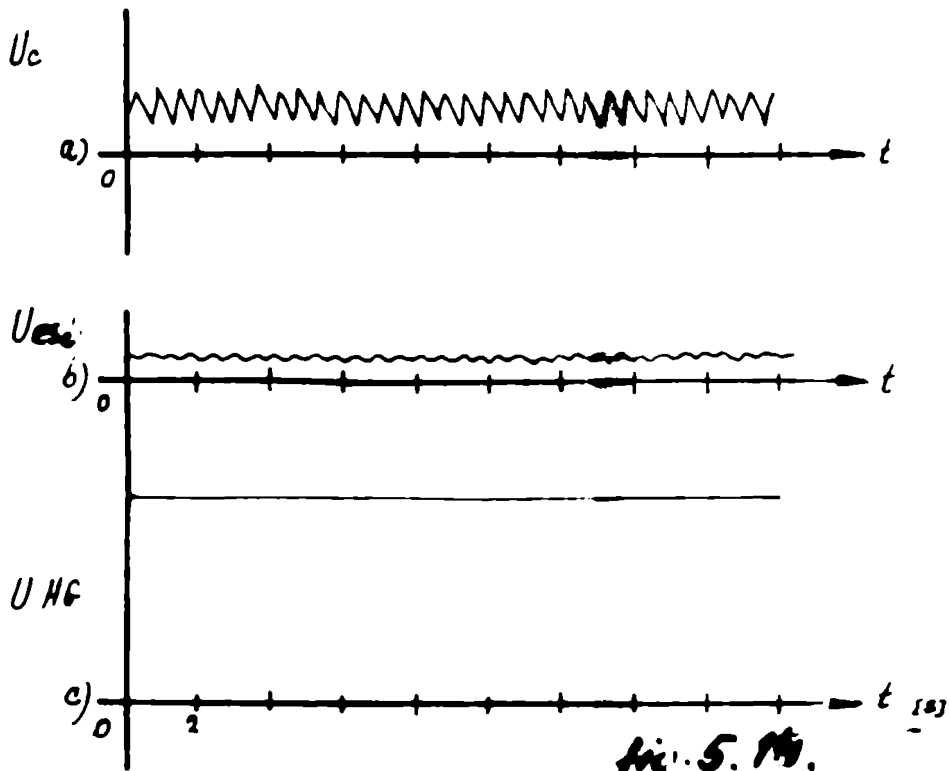


fig. 5.14.

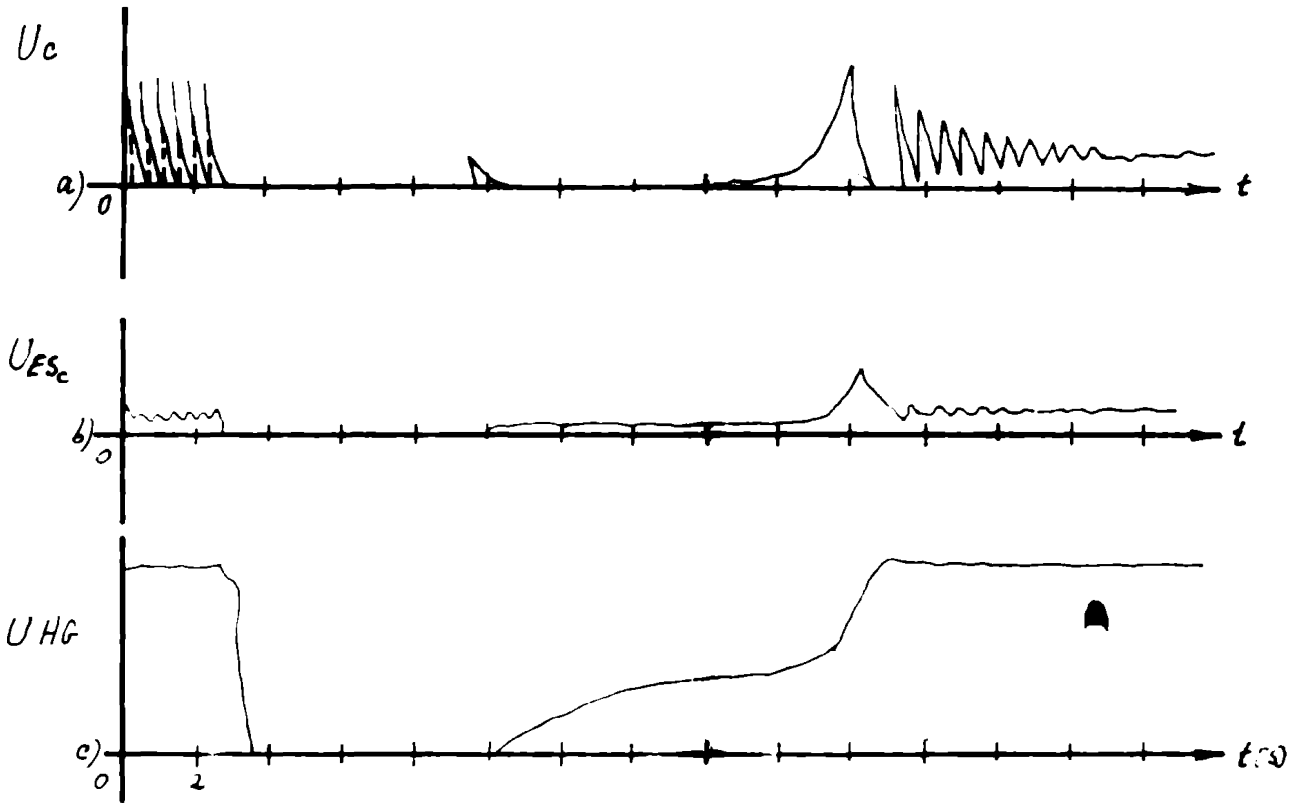


fig. 5.15.

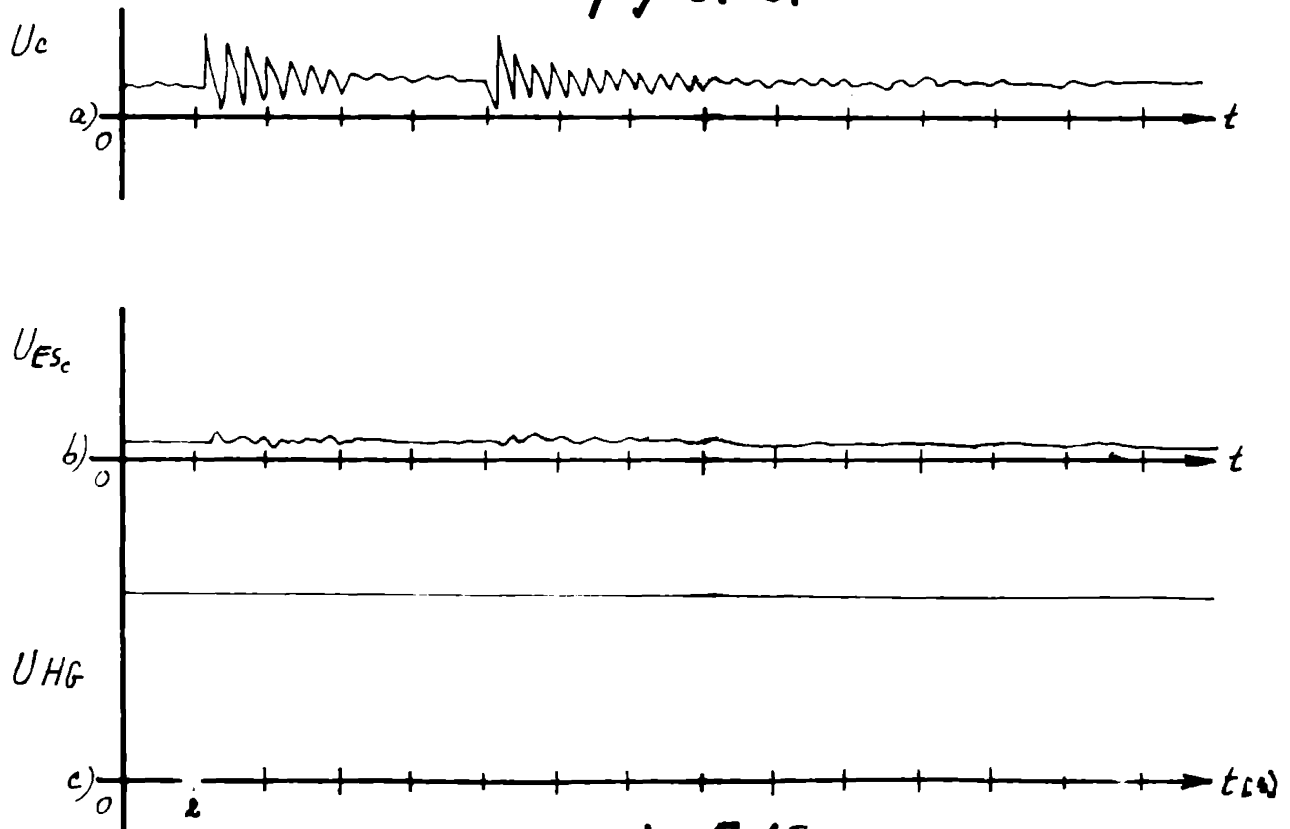


fig. 5.16.

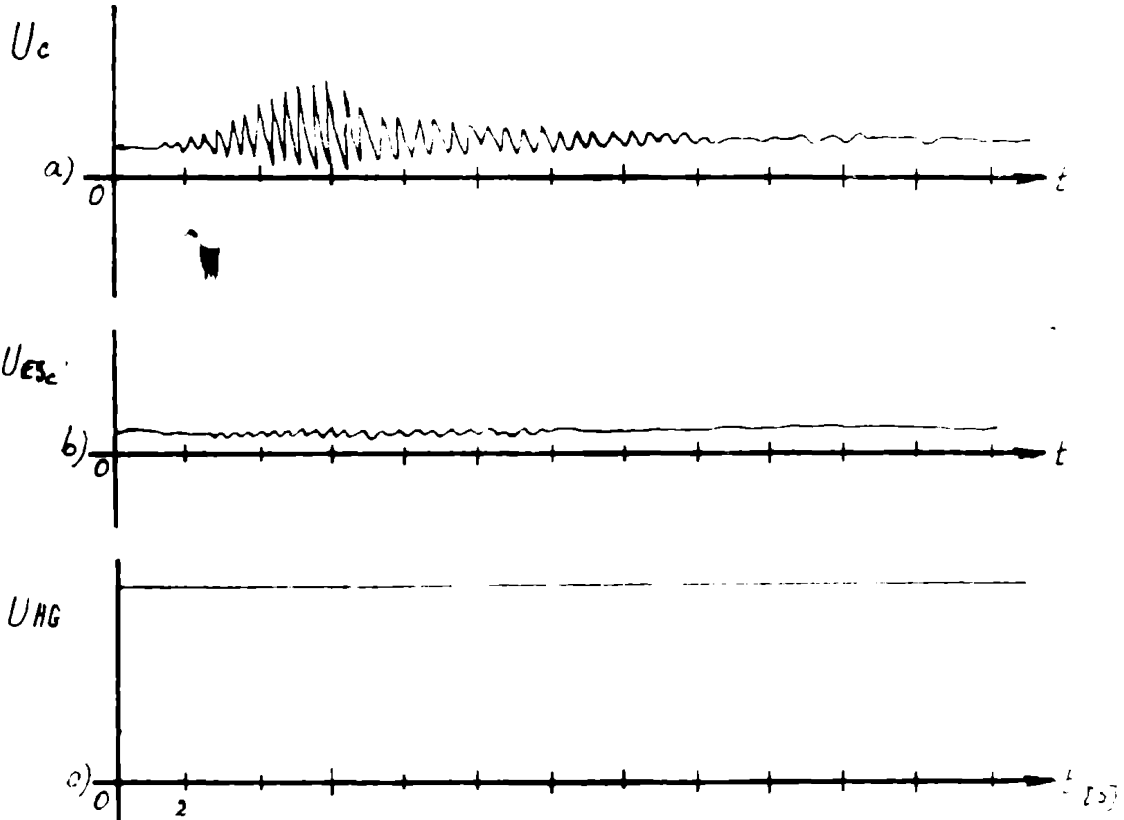


fig. 5.17.

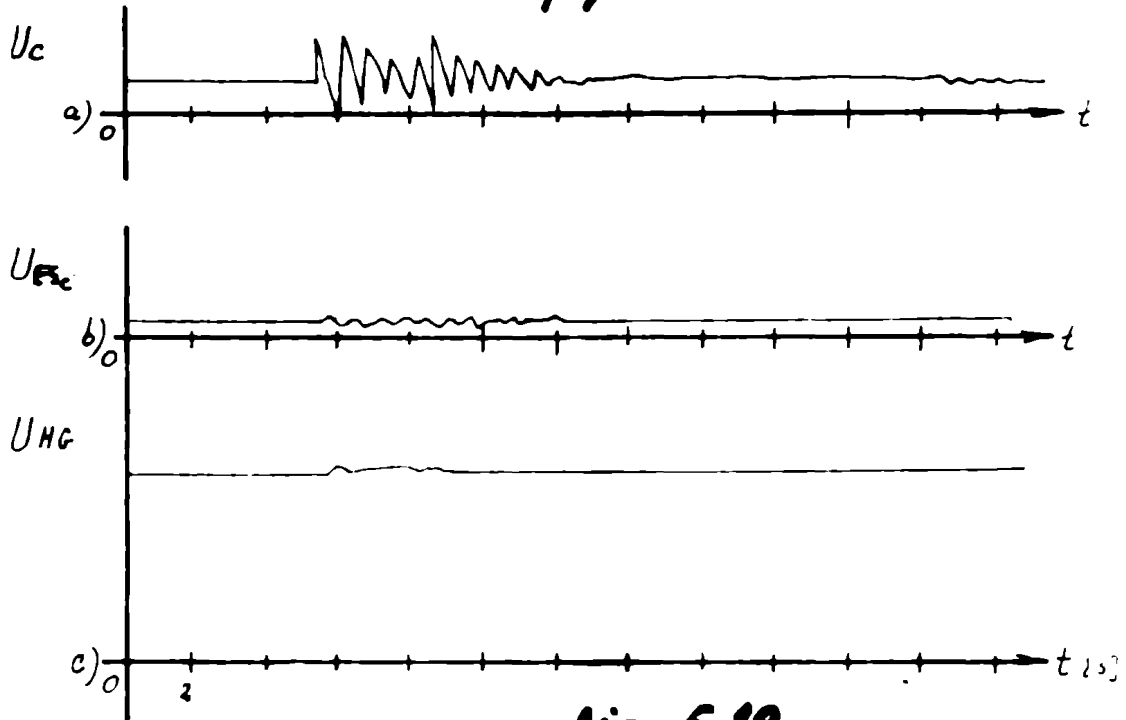
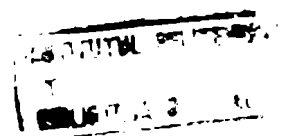


fig. 5.18.



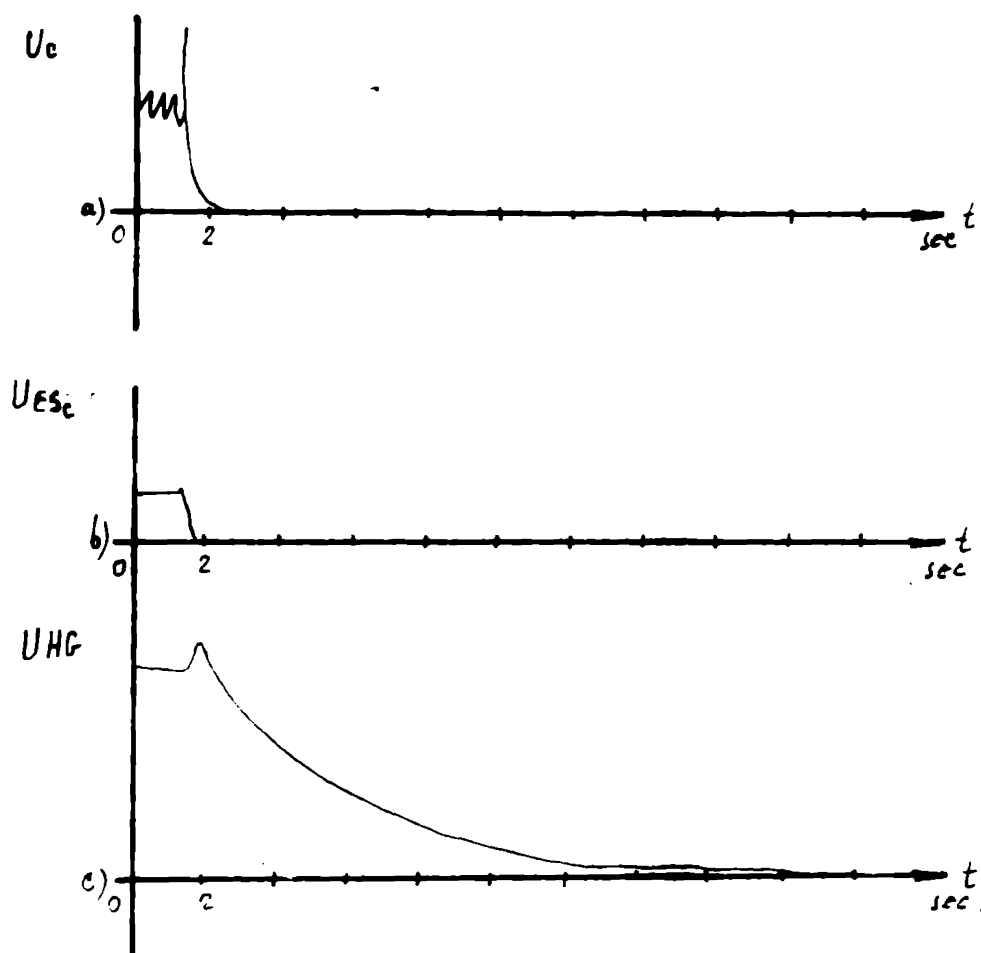


fig. 5.19.

o creștere tranzitorie a tensiunii la borne (figura 5.19), de aproximativ $U_{m1} 15\%$ pentru 3000 kW, 3000 MW), iar timpul de deconectare este ceva mai scurt decât în cazul în care generatorul funcționează în regim manual de excitație.

În analiza oscilogramelor de mai sus, reiese că modificarea tensiunii de comandă, determină practic instantaneu, modificarea tensiunii de excitație a hidrogenatorului U_{mag} , ceea ce evidențiază că existența redresorului rotativ cu diode în circuitul de excitație al generatorului nu duce la înfruntărilor posibilităților de reglare a tensiunii, iar timpul de comutație al diodelor precum și forma tensiunii redresate, nu influențează comportarea generatorului cuplat cu regulatorul automat de tensiune.

Rezultatele experimentale obținute cu excitatoarele sincroni cu diode rotative proiectată și funcționarea de mai mulți ani în centralele hidroelectrice a sistemului de excitație prevădută cu aceste excitatoarele, dovedesc fiabilitatea ridicată a mașinilor și confirmă metodele de proiectare elaborată în lucrare.

Capitolul VI

CONCLUZII

În lucrare se prezintă soluțiile unor probleme actuale și de perspectivă, care au apărut la realizarea sistemului de excitație cu excitatoarea sincronă cu diode rotative, pentru hidrogeneratoarele sincrone, care se proiectează și se fabrică la noi în țară. Hidrogeneratoarele sincrone cu diode rotative sînt mașini unicate sau serii mici, care sînt proiectate de către Centrul de Cercetare Științifică și Inginerie Tehnologică pentru Echipamente Hidroenergetice, executate de Întreprinderea de Mașini din Reșița și echipează obiective importante ale economiei naționale. Sînt prezentate soluțiile de realizare a excitatoarelor sincrone cu diode rotative, unele originale brevetate, ca de pildă instalația de redresare rotitoare polifazăată, apoi se studiază principalele procese tranzitorii specifice acestor mașini și în funcție de relațiile obținute pentru viteza de excitație a excitatoarei în cursul forțării excitației, se stabilește o metodă de proiectare optimă, avînd drept criteriu de optimizare obținerea unei viteze de excitație maximă.

Pentru verificarea rezultatelor teoretice obținute în prezenta lucrare s-a prezentat un calcul de dimensionare și electromagnetic al unei excitatoare sincrone cu diode rotative și măsurătorile efectuate asupra acestei mașini, atît pe standul de probă al uzinei producătoare, cît și în centrala hidroelectrică unde asigură excitația hidrogeneratorului sincron.

Pe baza rezultatelor teoretice și experimentale obținute se pot estima următoarele concluzii:

1) Din studiul critic al sistemelor de excitație ale generatoarelor sincrone folosite în prezent a rezultat că sistemul de excitație cu excitatoare sincronă cu diode rotative se impune ca o alternativă viabilă, prin avantajele pe care le prezintă în special în cazurile în care curentul de excitație și turația nominală a generatorului principal au valori ridicate și mijlocii. În aceste cazuri excitatoarea sincronă cu diode rotative are greutatea considerabil mai mică și randamentul mai mare decît excitatoarea de curent continuu, iar parametrii funcționali, comparabili cu cei ai excitatoarei de curent continuu.

În toate cazurile utilizării sistemului de excitație cu excitație sincronă cu diode rotative se elimină neajunsurile legate de transmiterea curentului prin contacte alunecătoare de tipul colector-perii și inele de contact-perii.

2) În realizarea excitatoarei sincrone cu diode rotative elementul principal îl constituie înfășurarea indusului (rotorului), pentru care s-au precizat tipurile de bobinaje specifice acestor mașini, prezentând și soluțiile constructive de realizare a conexiunilor acestor înfășurări, precum și ale legăturilor spre instalațiile de redresare rotitoare cu diode.

3) Posibilitățile de redresare în instalațiile de redresare rotitoare cu diode cu siliciu, sînt analizate și corelate cu tipul de înfășurare considerat pentru indusul excitatoarei sincrone; se prezintă o soluție originală de instalație de redresare rotitoare polifazată brevetată și executată pentru o mașină de mare performanță.

4) În lucrare s-au stabilit, prin adoptarea teoriei celor două axe pentru situația în care cîmpul inductor este imobil și constant, ecuațiile de funcționare care definesc comportarea excitatoarei sincrone cu diode rotitoare; ecuațiile respective au fost deduse de autor și pot fi folosite atît pentru studiul fenomenelor care au loc în excitatoarea sincronă cu diodele rotitoare în regim staționare, cît și cele ce intervin în regimurile tranzitorii generale, respectiv specifice acestui tip de mașină.

5) Pe baza ecuațiilor de funcționare stabilite în teoria celor două axe pentru excitatoarea sincronă, transpune în planul variabilei complexe "p" prin intermediul funcțiilor imagine, a ecuațiilor redresorului rotativ cu diode și ale sarcinii excitatoarei (înfășurarea rotorică a generatorului sincron principal) s-a determinat expresia tensiunii în timpul forțării excitației și deciviteza de excitație a excitatoarei sincrone cu diode rotative.

6) Din studiul regimurilor tranzitorii specifice acestor mașini, adică forțarea excitației și dezexcitarea rapidă s-au stabilit posibilitățile de obținere a unei viteze de excitație corespunzătoare, respectiv a unei dezexcitări cît mai rapide în caz de avarie.

7) Pentru dimensionarea optimală a excitatoarei sincrone cu diode rotative s-au stabilit elementele principale de care depinde comportarea corespunzătoare a sistemului de excitație și a ansamblului excitatoare-generator sincron.

8) S-a elaborat o metodică de proiectare și un program de calcul original pentru excitatoarea sincronă cu diode rotative, în baza criteriului de optimizare adoptat, al vitezei de excitație maximă.

9) Rezultatele obținute în proiectarea unei game largi de excitatoare sincrone cu diode rotative, utilizate la hidrogenatoarele sincrone s-au prezentat tabelar, precum și un exemplu de calcul pentru o astfel de mașină, pe baza metodei de proiectare optimală propusă de autor. Randamentul e citaotarei cu diode rotative prezentată în lucrare este cu aproximativ 5% mai mare decât randamentul unei excitatoare de curent continuu cu aceleași date nominale.

10) În vederea verificării performanțelor ace tui tip de mașină s-a stabilit un program de încercări și s-a conceput o instalație și o schemă de legături originale pentru încercarea excitatoarei sincrone cu diode rotative pe ștandul de probă uzinal.

11) Rezultatele experimentale obținute cu excitatoarea sincronă cu diode rotative, atât pe ștandul de probă uzinal, cât și în centrale hidroelectrice s-au comparat cu valorile calculate pe baza metodei de proiectare optimală stabilită. Din această analiză s-a constatat o bună concordanță între valoarea vitezei de excitație calculată și cea măsurată (de ordinul 5; 6%), iar viteza de excitație optimală este superioară celei inițiale cu aproximativ 25%.

12) Prin extinderea aplicării metodei de proiectare optimală la excitatoarele aflate în faza de proiectare sau de lansare în fabricație, se va putea îmbunătăți viteza de excitație a excitatoarei sincrone cu diode rotative, prin optimizarea înfășurării inductoare a excitatoarei, uneori realizând și economii cu cupru față de varianta inițială.

Prezenta lucrare este rezultatul unor necesități obiective, legate de modernizarea hidrogenatoarelor, prin utilizarea sistemului de excitație cu excitatoare sincronă cu diode rotative.

Problemele abordate și o mare parte din soluțiile elaborate în cadrul lucrării au un caracter original și au permis conceperea și realizarea unei game largi de mașini de acest tip. Totodată prin metode de proiectare optimală prezentată se

va putea îmbunătăți viteza de excitație a acestui sistem de excitație, devenind astfel mai competitiv în opțiunea pentru un anumit sistem de excitație.

Lucrarea constituie o contribuție cu valoare practică pentru cunoașterea acestui tip de excitatoare, cu perspective de extindere și utilizare la toate mașinile sincrone, atât generatoare cât și motoare. Prin urmare, materialul prezentat se aplică direct și integral în proiectarea excitatoarelor sincrone cu diode rotative la Centrul de Cercetare Științifică și Inginerie Tehnologică pentru Echipamente Hidroenergetice Reșița și la realizarea lor la Intreprinderea de Construcții de Mașini Reșița

CARTELA 3.

- | | | |
|---------------------------|----------------|-------|
| 1. — Tensiunea nominală. | U_{Esc} | /V/ |
| 2. — Curentul nominal. | I_{Esc} | /A/ |
| 3. — Turația nominală. | n_n | /rpm/ |
| 4. — Număr de poli. | $2p$ | /-/ |
| 5. — Număr de faze rotor. | m | /-/ |
| 6. — Factor de putere. | $\cos \varphi$ | /-/ |

1						6						9
10						15						18
19						23						26
												29
												31
												37

CARTELA 4.

- | | | |
|--|----------|------|
| 1. — Diametrul exterior rotor. | D_{er} | /mm/ |
| 2. — Diametrul interior rotor. | D_{ir} | /mm/ |
| 3. — Lungime totală rotor. | L | /mm/ |
| 4. — Nr canale de ventilație în rotor. | n_s | /-/ |
| 5. — Lățime canal ventilație. | b_c | /mm/ |
| 6. — Lățime pachet elementar + canal. | t_c | /mm/ |
| 7. — Nr crestături rotorice. | Z | /-/ |
| 8. — Nr conductori efectivi pe crestătură. | Z_{n1} | /-/ |
| 9. — Nr căi de curent în paralel | α | /-/ |

1						6						9
10						15						18
19						23						26
												27
						30						35
						36						42
												43
												46
												48

CARTELA 5.

- | | | |
|--|-----------|------|
| 1. — Lățime crestătură rotor. | b_{c1} | /mm/ |
| 2. — Înălțime crestătură rotor. | h_{c1} | /mm/ |
| 3. — Înălțime pană + istm. | h_4 | /mm/ |
| 4. — Gros. bilaterală izolație în crestătură. | b_i | /mm/ |
| 5. — Scurtarea (lungirea) pasului înfășurării. | β | /-/ |
| 6. — Coeficient de umplere fier rotor. | K_{FeR} | /-/ |
| 7. — Marca tola rotor ¹⁾ | MTR | /-/ |

1						4						7
8						11						14
						15						19
						20						24
						25						32
						33						37
												38

1) Mărcile de tablă silicioasă se codifică astfel:

343 - cod 14 ; M43-24 - cod 15.

CARTELA 6

- 1 - Diametrul exterior jug.
- 2 - Lungime jug stator
- 3 - Lungime pol rotor
- 4 - Înălțime corp pol
- 5 - Lățime corp pol
- 6 - Înălțime talpă polară
- 7 - Înălțime minimă talpă polară
- 8 - Lățime talpă polară

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63

CARTELA 7

- 1 - Curent de excitație maxim admis
- 2 - Densitate de curent maxim admis
- 3 - Matricea numărului de saire pe pol.
- 4 - Matricea secțiunilor sairei de excitație
- 5 - Viteza de excitație minimă impusă

$I_{exmax} \dots (25; 30; 35; 40)$

$j_{exmax} \dots (1,2 \dots 1,6)$

WESE (0)

SESE (f)

V_{exmin}

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

CARTELA 8

- 1 - Coef. de umplere fier pol.
- 2 - între fier
- 3 - între fier maxim
- 4 - Marcă tablă jug stator¹⁾
- 5 - Marcă tablă pol stator¹⁾

$k_{res} \quad | - |$

$\delta \quad (mm)$

$\delta_{max} \quad (mm)$

MJS $| - |$

MPS $| - |$

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

¹⁾ Marcile de tablă silicioasă se codifică astfel

343 - cod 14

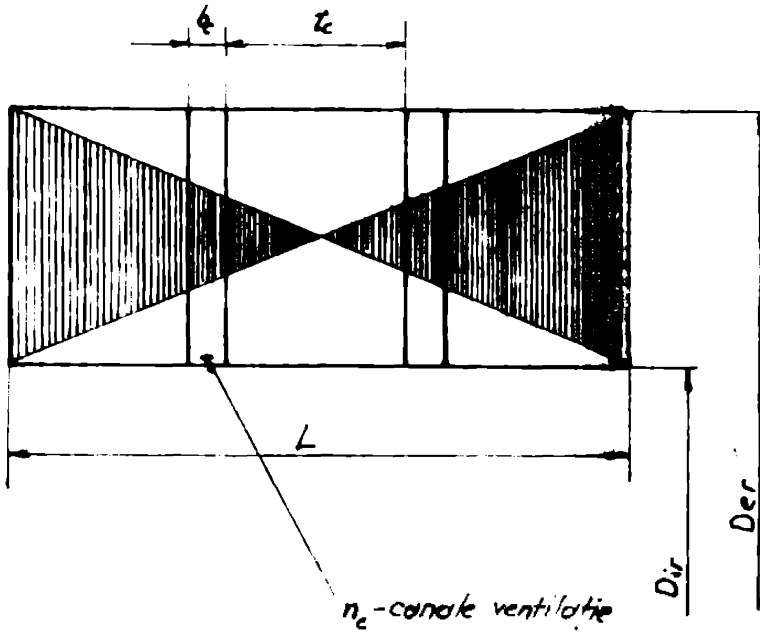
M43 - cod 15

0137 - cod 16.

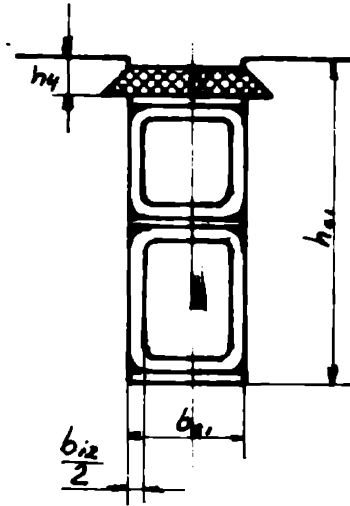
Calculul excitatoarei simon m-jacate

ELEMENTE GEOMETRICE DIN "DATE INITIALE"

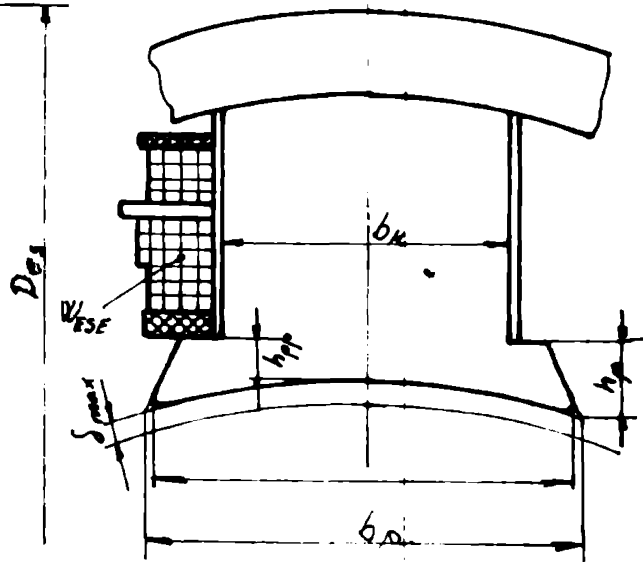
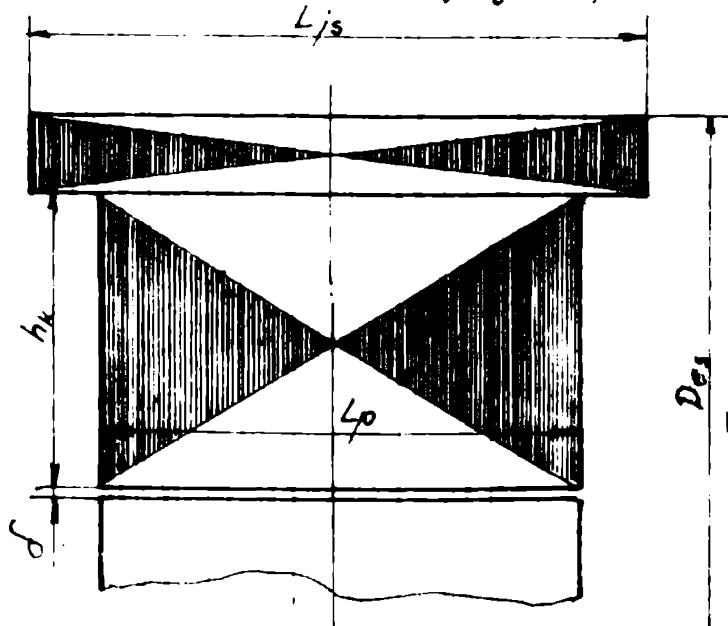
Rotor



Crestătura rotor



stator (jug si pol de excitatie)



B i b l i o g r a f i e

1. A. Abolins-Fr. Heinrichs- **Brushlose Erreger mit rotierenden Gleichrichtern für grosse Turbogeneratoren.** ETZ (Januar 1966).
2. Andre Angot - **Complemente de matematici**-Editura tehnică 1966.
3. Andronescu P. - **Bazele electrotehnicii**-Editura didactică și pedagogică București.
4. C. Apetrei - **Optimizarea mașinilor și a transformatorilor electrice**-Studii și cercetări de energetică - nr.4-66.
5. Achenbach - **Regelung grosser Wasserkraftgeneratoren** E.T.Z.-4-Heft 7-1960.
6. C. Băilă - **Mașini electrice**-Editura didactică și pedagogică București 1982.
7. K. Bonfert - **Betriebsverhalten der Synchronmaschine** Springer-Verlag-Berlin, Göttingen, Heidelberg-1962, pag.164-193.
8. T. Bodafeld, H. Sequenz - **Elektrische Maschinen** - pag.500-510 Springer-Verlag 1965.
9. Ga. Buruhin, I. A. Morozov - **Cercetarea proceselor la forțarea excitației generatorului sincron cu sisteme de excitație fără perii**-Electricitvo-6/1973.
10. M. Canay - **Überspannungen im Feldkreis von Synchronmaschinen mit Gleichrichterexcitation**-BBC Brown Boveri, Druckschrift Nr. CH-TC 7C 113D.
11. M. Canay - **Experimentelle Ermittlung der Ersatzschemate und der Parameter einer idealisierten Synchronmaschine.** BBC-Sonderdruck aus Bulletin des schweizerischen Elektrotechnischen Vereins CH-B 7.20020.C D.
12. M. Canay - **Ersatzschemate der Synchronmaschine zur Vorusberechnung von Polradgrößen bei nichtstationären Vorgängen sowie syn-**

chronen Anlauf: Teil II, Schenkelpolmaschinen, BEM-2-69(60-71).

13. M. Cansy - Block Diagrams and Transfer Functions of the Synchronous Machine, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems-Vol. pas. 85 No. 9 Sept. 1966.
14. M. Cansy - Asynchronous starting of synchronous machines with or without rectifiers in the field circuit. Proc. IEE. vol. 119, no. 12/1972.
15. M. Cansy and I. Simand - Rotor overvoltage and interturn voltages in the Field winding of Synchronous Machines-IEC Publication No. CH-T 130245 F.
16. Cimpeanu A. - Maşini Electrice-Editura Serisul Românesc 1977.
17. Chioncel P. - Regimurile tranzitorii ale excitaţiei sincronice cu convertor rotativ cu diode cu siliciu-SIMECS'83 I.P. Bucureşti.
18. Chioncel P. - Instalaţie de redresare rotitoare polifazată-invenţie-Certificat de autor nr. 73432/81.
19. Constantin P. şi alţii- Electronică industrială-Ed. didactică şi pedagogică Bucureşti.
20. S. Călin - Reguletoare automate-Ed. didactică şi pedagogică Bucureşti 1976.
21. L. Debernardi, R. Gillet- Systeme d'excitation compact pour alternateur nucleaire a quatre poles AEM-Centrales 1974.
22. T. Dordea - Maşini electrice-Ed. didactică şi pedagogică Bucureşti 1977.
23. M. Diaconescu, I. Graur - Mutătoare-baze teoretice şi elemente de proiectare-Ed. didactică şi pedagogică 1978.
24. H. Eggelin - Begrenzung der Erregung von Synchronmaschinen BEM 63/1976 (11).

25. H. Frohne - Rationalisierung beim Entwurf elektrischer Maschinen unter Verwendung digitaler Rechenautomaten. ETZ-A, Bd. 84 (M6)
26. H. J. Gandert - Erregungssysteme für grosse generatoren BBC-Nachrichten, 1980-Heft 10.
27. I. Grando - Solicitățile diodelor din sistemul de excitație rotativ al hidrogenatoarelor în timpul demeritării- Construcția de mașini nr. 3/1980.
28. A. Haböck, G. Knecht - Rotierende Gleichrichterexcitation von Synchronmotoren-Siemens Zeitschrift 1968-Heft 11.
29. G. Knecht - Rotierende Stromrichterexcitation von Synchronmotoren, Blindleistungsmaschinen und Stromrichteromotoren-Siemens Zeitschrift 1970-Heft 5.
30. M. Bröderling - Anlauf schleifringloser Synchronmotoren für Kolbenkompressoren-BBC Mitteilungen, Bd. 55, Nr. 10/11 Oct./Nov. 1968.
31. U. M. Bobrov, Gertsengberg, G. R. Kildistrov, V. S. Kovalkov - Development of excitation and control systems of large turbo-generators, hidrogenators and synchronous condensers. World electrotechnical Congress Jun. 21-25, Moscow 1977.
32. Cotman G. M., Drexler-Dvorschek, Gerlitz R. K. - Descriptions and Tests of the Genex Excitation System for large steam Turbine-Generators. - IEE Transactions, Vol. PAS-95, nr. 3 May/June 1976, pag. 803-811.
33. Chambers G., Jemowski P. W. - Control for the GENEX excitation. Presented at the 1977 Joint Power Generation Conference, Long Beach, California, Sept. 1977.
34. Beugles P. H., Carlson K. - Generator and Power System Performance with the GENEX Excitation System. IEEE Transactions, vol. PAS 95, nr. 2 March/April 1976 pag. 489-493.
35. Fenwick D. R., Wright W. - Review of trends in excitation systems and possible future developments Proc. IEE, Vol. 123, no. 5 May 1976.

36. Jones N.H. - Performance and service experience with GENREX Excitation Systems for Large Steam Turbine-Generators, CIGRE Studienkomitee 11, Aug/Sept. 1978, Bericht 11-04.
37. Gerletz R.K.,
Germann R.E.,
Temoschok M. - The GENREX System for large steam Turbine-Generators-Presented at the Pacific Coast Electric Association Engineering and Operation Conference-Culver City, California.
38. Dvorshac I.I., Lane
L.I. Sinelari - Shunt Thyristor Rectifiers for the GENREX Excitation System-IEEE Transactions vol. PAS-96, nr. 4 July/August 1977/1219-1225.
39. Gheorghiu I.
Frensus A. - Tratat de masini electrice. Ed. Academiei RSR-
vol. IV-Masini sincrone-1972.
40. Kovacs K., Pal - Analiza regimurilor tranzitorii ale masinilor electrice-Ed. tehnica Bucuresti 1980.
41. Th. Leibler - Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb-Springer-Verlag 1951.
42. Kovacic, T.
Stiphout - Synchronmaschinen im Leistungsbereich von 250-11200 KVA-IEC Druckschrift nr. CH-T 500LD.
43. G. K. Jerve - Inercările masinilor electrice rotative-Ed. tehnica Bucuresti (traducere din limba rusă).
44. IEEE Committee Report-Computer Representation of Excitation Systems-IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. pas 87, no. 6 June 1968.
45. F.P. Demello,
Ch. Concordia - Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control IEEE Transactions on Power and System vol. Pas 88, Nr. 4 April. 1969.
46. G. Müller - Elektrische Maschinen-Berlin-VEB-Verlag Technik, 1967.
47. V.N. Nedelcu - Teoria conversiei electronice-Ed. tehnica Bucuresti 1978.
48. A. Nicolaidis - Masini electrice-vol. II. Ed. Seriaul romane Craiova 1975.

49. I. Novac - Maşini electrice partea I, II Institutul Politehnic "Tr. Vuls" Timişoara 1975.
50. R. Răduleţ, M. Căpăşchi - Proiectarea hidrogenatoarelor şi a motoarelor sincrone - Ed. tehnică Bucureşti 1980.
51. Alekseev A. E. - Construcţia maşinilor electrice - Ed. energetică de stat 1954.
52. Klant J. - Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen, Berlin, Springer Verlag 1962.
53. Linschitz M. - Die elektrischen Maschinen
54. Richter R. - Elektrische Maschinen - Berlin Verlag Zweiter Band von Julius Springer 1930.
55. Richter K. - Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen, Berlin - Verlag von Julius Springer 1920.
56. G. Rinaldo - Motoare sincrone trifazice fără perii Ecole-Italia.
57. P. Robert, L. le Prince - Le developpement des excitatrices a diodes tournantes - CIGRE 1968.
58. Seguíez G. - Le montages redresseurs a commutations serie - Revue Generale de l'Electricite - Decembre 1964.
59. Boldea I., Atanasiu G. - Analiza unitară a maşinilor electrice Ed. Academiei RSR - Bucureşti 1985.
60. F. Pender, H. Butz - Erregersysteme für Drehstrom Generatoren in Industrie und mittleren Kraftwerken - IEM (CE-T 0700 63 D).
61. Robert P., Diopsaux, Decier I. - L'amélioration du rendement des turboalternateurs - CIGRE 1964 report no. 124.
62. Wiedeman, Kellenbenger - Konstruktion elektrischer Maschinen Berlin - Springer Verlag 1967.
63. Al. Moceanu - Redresoare cu siliciu - Ed. tehnică Bucureşti 1966.
64. STAS 8211-78 - maşini sincrone trifazate. Metode de încercare.

65. A. Vălkănescu, M. Ciobanu - Dispositive semiconductor - annual de utilizare - Ed. tehnică București 1975.
66. D. Teodorescu - Mașini electrice - Soluții noi, tendințe, orientări - Ed. Facultate 1981.
67. H. Reiche - Die optimale Auslegung elektrischer Maschinen unter dem Gesichtspunkt der Material und Energieökonomie - Electrica 1981/nr.4
68. Reiche, Glöckner - VEM-Handbuch, Maschinelles Berechnen elektrischer Maschinen, Verlag Technik Berlin 1973.
69. K. Fork, W. Juling, - Dämpfung von Leistungsschwingungen durch Beeinflussung der Generatorerregung - Siemens Energietechnik(1)/1981 .
70. Glebov I. A. - Sistemă voadjdenie voșnăh sinhronăh mașin - Moscova 1978.
71. J. Kleut - Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen - Springer Verlag - Berlin/Göttingen /Heidelberg.
72. G. N. Boruhin, I. A. Morozova - Cercetarea proceselor la forțarea excitației generatorelor sincrone cu sistem de excitație fără perii. Electricitate 1973.
73. N. A. Glebov, Loghin, Refilov - Rezultatele cercetării sistemelor de excitație fără perii ale generatorelor "Electrotehnica" 1970/nr.1.
74. GCST-105/72 - Principalele caracteristici tehnice ale hidrogenatorilor sincrone.
75. - - Die bürstenlose Erregung von Synchro- maschinen durch rotierende Halbleiter Gleichrichter, No. CH-TC 70 163 D-BBC.